



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY

A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

DIAGNOSTIKA TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH  
STROJŮ

DIAGNOSTICS OF ROTATING ELECTRIC MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Patrik Soukup

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO 2018

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Patrik Soukup

**ID:** 164781

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Diagnostika točivých elektrických strojů

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s diagnostickými metodami používanými u elektrických strojů a vypracujte literární rešerši na toto téma.
2. Na konkrétním elektrickém stroji proveďte diagnostiku několika metodami.
3. Vyhodnoťte použité metody.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714, [1] s.
- [2] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.
- [3] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.

**Termín zadání:** 5. 2. 2018

**Termín odevzdání:** 21. 5. 2018

**Vedoucí práce:** Ing. Marcel Janda, Ph.D.

**doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**  
předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č.121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## Abstrakt

Diplomová práce *Diagnostika točivých elektrických strojů* se zabývá teorií diagnostiky točivých strojů, zaměřenou zejména na diagnostiku asynchronních motorů vysokého výkonu. Vzhledem k důležitosti udržení bezporuchového stavu těchto strojů, s ohledem na provozuschopnost, roste význam jejich diagnostiky. V důsledku nevhodných pracovních podmínek nebo z mnoha dalších důvodů mohou ve stroji vzniknout různé typy poruch. Seznam a způsob vzniku případných poruch je v této práci obsažen a vysvětlen.

S rostoucím věkem stroje je důležité kontrolovat stav izolace prostřednictvím zkoušek izolační schopnosti. Tyto zkoušky jsou v praktické části práce provedeny a výsledky prezentovány. V případě asynchronních strojů, každá porucha zanechává stopu ve formě elektrického, magnetického nebo vibračního signálu. Tyto signály jsou analyzovány a vyhodnocovány pomocí specifického měřicího vybavení se záměrem rozhodnout o aktuálním stavu stroje.

Za hlavní metodu diagnostiky asynchronních motorů je v této práci považována podpisová analýza statorového proudu (MCSA), která je zde detailně teoreticky popsána a aplikována v elektrotechnické praxi.

## Abstract

The thesis *Diagnostics of rotating electric machines* deals with the theory of diagnostics of rotating machines, focusing especially on the diagnosis of asynchronous motors of high power. Due to the importance of maintaining the trouble-free condition of these machines with regard to serviceability, the importance of their diagnosis is growing. Due to inappropriate working conditions or for many other reasons, different types of malfunctions may occur in the machine. The list and the way of occurrence of possible failures are included and explained in this thesis.

With the growing age of the machine, it is important to check the insulation status through insulation testing. These tests are performed in the practical part of the thesis and the results are presented. In the case of asynchronous machines, each anomaly leaves a signature in the form of an electrical, magnetic or vibrational signal. These signals are analyzed and evaluated using a specific measuring equipment with the intention of deciding on the current state of the machine.

Motor current signature analysis (MCSA) is considered to be the main diagnostic method of asynchronous machines in this thesis. This method is described in detail in this paper and is being applied in electrical engineering.

## **Klíčová slova**

Asynchronní stroj, diagnostika, izolační vlastnosti vinutí, metody diagnostiky asynchronních strojů, on-line diagnostika, off-line diagnostika, poruchy asynchronního stroje, MCSA.

## **Keywords**

Asynchronous machine, asynchronous machine faults, diagnostics, diagnostic methods of asynchronous machines, MCSA, on-line diagnostics, off-line diagnostics, winding insulation properties.

## **Bibliografická citace:**

SOUKUP, P. *Diagnostika točivých elektrických strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..

## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma *Diagnostika točivých elektrických strojů* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **18. května 2018**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcelovi Jandovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Mé poděkování dále patří pánům Ing. Ondřejovi Zabloudilovi, Ing. Josefovi Muchovi, Bc. Jiřímu Švestkovi a Ing. Martinovi Čápovi, Ph.D. za informační a materiální záštitu při vypracovávání praktické části této práce.

V Brně dne 18. května 2018

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Diagnostika .....	2
2.1	Technická diagnostika a její význam.....	2
2.2	Vztah diagnostického systému k diagnostikovanému objektu.....	3
2.3	Poruchy asynchronního motoru.....	6
2.3.1	Poruchy statoru .....	6
2.3.2	Poruchy rotoru.....	12
2.3.3	Poruchy ložisek.....	15
2.4	Diagnostika asynchronního stroje .....	16
2.4.1	Systém on-line a off-line.....	17
2.4.2	Metodika diagnostiky asynchronního motoru .....	18
2.4.3	Často užívané diagnostické metody ASM .....	20
2.4.4	Teorie podpisové analýzy statorového proudu (MCSA).....	23
2.4.5	Fourierova transformace .....	28
3	Praktická část .....	33
3.1	Měření statických vlastností vinutí stroje.....	33
3.1.1	Měření odporu, indukčnosti a kapacity vinutí.....	34
3.1.2	Vysokonapěťová zkouška konstantním napětím .....	36
3.1.3	Zkouška rázovou vlnou.....	39
3.2	Podpisová analýza statorových proudů.....	42
3.2.1	Odhad hodnoty skluzu stroje .....	44
3.2.2	Výpočet hledaných poruchových frekvencí pro podpisovou analýzu .....	47
3.2.3	Vztažené hodnoty amplitud .....	50
3.2.4	Výsledky podpisové analýzy .....	51
4	Závěr .....	58
	Literatura .....	60
	Přílohy .....	67



# Seznam obrázků

Obrázek 1. Mezizávitový zkrat jedné fáze statoru ASM .....	8
Obrázek 2. Mezifázový zkrat statoru ASM.....	9
Obrázek 3. Zemní zkrat statorového vinutí ASM .....	11
Obrázek 4. Typy excentricit vzduchové mezery a) bez excentricity b) statická excentricita; c) dynamická excentricita; d) smíšená excentricita .....	15
Obrázek 5. Části valivého kuličkového ložiska [14] .....	16
Obrázek 6. Náskres kuličkového ložiska .....	26
Obrázek 7. Příklad frekvenčního spektra zdravého stroje [24].....	27
Obrázek 8. Příklad frekvenčního spektra při poruše rotorových tyčí [24] .....	27
Obrázek 9. Příklad dělení transformací pro počet vzorků $N=8$ .....	30
Obrázek 10. Postup výpočtu diskrétní Fourierovy transformace pro $N=8$ prostřednictvím Cooley-Tukey algoritmu .....	30
Obrázek 11. Signál v časové oblasti a) obdelníkové okno b) Hammingovo okno....	32
Obrázek 12. Frekvenční spektrum signálu a) obdelníkové okno – spektrální únik b) Hammingovo okno – potlačení spektrálního úniku.....	32
Obrázek 13. Měřicí stanice SKF, Baker DX-15.....	34
Obrázek 14. Průběh nárůstu izolačního odporu v čase - motor 1 .....	37
Obrázek 15. Průběh nárůstu izolačního odporu v čase - motor 2 .....	38
Obrázek 16. Průběh nárůstu izolačního odporu v čase - motor 3 .....	38
Obrázek 17. Porovnání průběhů rázové zkoušky - motor 1.....	40
Obrázek 18. Porovnání průběhů rázové zkoušky – motor 2 .....	40
Obrázek 19. Porovnání průběhů rázové zkoušky – motor 3.....	41
Obrázek 20. Porovnání průběhů rázové zkoušky .....	42
Obrázek 21. Závislost velikosti statorového proudu na skluzu .....	45
Obrázek 22. Zkreslení spektra vlivem signálu HDO – motor 5 (2016) .....	51
Obrázek 23. Spektrogram - motor 5 (2016).....	52
Obrázek 24. Spektrum bez vlivu HDO - motor 5 (2016).....	53
Obrázek 25. Spektrum rotorových tyčí - motor 5 (2016) .....	54
Obrázek 26. Spektrum rotorových tyčí - motor 5 (2017) .....	54
Obrázek 27. Spektrum rotorových tyčí - motor 5 (2018) .....	55
Obrázek 28. Spektrum rotorových tyčí - motor 6 (2017) .....	56
Obrázek 29. Spektrum rotorových tyčí bez použití okna - motor 6 (2017).....	56
Obrázek 30. Spektrum rotorových tyčí - motor 6 (2018) .....	57

## Seznam tabulek

Tabulka 1. Štítkové hodnoty použitých motorů.....	33
Tabulka 2. Změřené hodnoty R, L a C - motor1 .....	35
Tabulka 3. Změřené hodnoty R, L a C - motor 2 .....	35
Tabulka 4. Změřené hodnoty R, L a C - motor 3 .....	36
Tabulka 5. Změřené hodnoty při vysokonapěťové zkoušce.....	36
Tabulka 6. Výpočet polarizačního indexu a dielektrické absorpce .....	37
Tabulka 7. Rázová zkouška – motor 1.....	39
Tabulka 8. Rázová zkouška – motor 2.....	39
Tabulka 9. Rázová zkouška – motor 3.....	40
Tabulka 10. Změřené hodnoty R, L – poruchový motor.....	41
Tabulka 11. Štítkové a technické hodnoty analyzovaných strojů .....	42
Tabulka 12. Chybovost proudového transformátoru PK 200.....	43
Tabulka 13. Výpočet skluzu z měření v roce 2016.....	45
Tabulka 14. Výpočet skluzu z měření v roce 2017.....	46
Tabulka 15. Výpočet skluzu z měření v roce 2018.....	46
Tabulka 16. Hodnoty zatížení během jednotlivých měření .....	47
Tabulka 17. Hodnoty frekvencí odpovídajících excentricitám (nižší hodnoty).....	48
Tabulka 18. Hodnoty frekvencí odpovídajících excentricitám (vyšší hodnoty).....	48
Tabulka 19. Hodnoty frekvencí odpovídajících poruchám rotorových tyčí.....	49
Tabulka 20. Poměr amplitud a jejich ekvivalent v dB.....	50

# 1 ÚVOD

V současné době si život bez elektrické energie umí představit pouze málokdo, neboť se během posledních dvou staletí stala nedílnou součástí každodenního života lidí po celém světě. Mezi nejběžnější způsoby užívání elektrické energie patří nepochybně přeměna na světelnou energii v žárovkách či diodách, nebo přeměna na energii tepelnou využitelnou k vytápění a ohřevu. Tyto zmíněné skutečnosti jsou dlouhodobým užíváním zabudované hluboko v povědomí lidstva a jsou považovány za naprosto elementární a samozřejmé. Ne každý si však uvědomuje důležitost elektrické energie kupříkladu napříč výrobními procesy, zejména pak její využití k napájení pohonných jednotek výrobních strojů v průmyslu-elektromotorů. Elektromotory lze obecně rozdělit na stejnosměrné a střídavé. Význam a rozsah využití těchto dvou typů točivých strojů se v průběhu jejich vývoje převážily ve prospěch strojů střídavých, a to zejména vzhledem k objevu funkčního principu asynchronních strojů. Za zrod těchto zařízení lze považovat přelom let 1887 a 1888. V této době známý chorvatsko-srbský fyzik Nikola Tesla objevil skutečnost, že magnetické pole může mít rotační charakter, pokud dvěma navzájem kolmými cívkami prochází střídavý proud s fázovým posunem rovným devadesáti stupňům. Na této podstatě následně vyvinul indukční motor, který je dnes znám spíše jako asynchronní motor.

Asynchronní motory jsou zdaleka nejrozšířenějším a nejužívanějším typem motorů a tvoří tak jádro skupiny poháněcích strojů. Vyznačují se výhodnými vlastnostmi, kterými jsou nízká pořizovací cena, vysoká účinnost, dnes již poměrně snadná regulace a jednoduchá, robustní konstrukce. V důsledku zmíněné konstrukce tyto stroje obvykle netrpí žádnými závažnějšími nebo často se objevujícími neduhy. Přesto, stejně jako všechna ostatní mechanická zařízení, i asynchronní motory podléhají jisté míře rizika vzniku poruch v důsledku nevhodného výrobního procesu jednotlivých částí, zátěže stroje, provozních podmínek, či jiného kritického faktoru. U konkrétních, pro daný výrobní celek důležitých strojů pak může odstavení vlivem poruchy znamenat nemalé finanční a materiální škody. Je tedy vhodné se podrobněji zabývat preventivní činností s úmyslem předcházet možným poruchám tak, aby k jejich vzniku ideálně vůbec nedocházelo, případně aby byl zhoršující se stav stroje monitorován a porucha včas odhalena. Takovéto preventivní šetření pomocí široké škály přístupů a prostředků lze souhrnně označit jako diagnostiku. Vzhledem k výše popsanému si tato práce klade za cíl vytvoření teoretického rozboru diagnostiky asynchronního motoru s návazností na jeho jednotlivé části včetně návrhu způsobů odhalení a odstranění jednotlivých poruch a následnou aplikaci těchto postupů do elektrotechnické praxe.

## 2 DIAGNOSTIKA

Diagnostikou obecně rozumíme identifikaci příčiny, povahy a následku určitého jevu za použití logiky, analytiky či praktických zkušeností.

Jak bude dále blíže vysvětleno, v technickém odvětví tak zaujímá důležitou roli, a to zejména při odhalení a eliminaci poruch. Má tudíž klíčový význam a je vhodné se o tuto problematiku hlouběji zajímat.

### 2.1 Technická diagnostika a její význam

Technická diagnostika je vědní obor, který se zaměřuje na získávání informací o technickém stavu diagnostikovaného objektu pomocí rozsáhlého množství metod, postupů a prostředků a jehož základním úkolem je detekce a lokalizace poruch a zjišťování jejich případného rozsahu. Diagnostika je úzce spjata s veškerými procesy výroby, přípravy a provozu zařízení a zaujímá tak velice důležité postavení. V současné době je systematické zkoumání stavu objektů velice aktuálním tématem v důsledku neustále rostoucích, zejména ekonomických a spolehlivostních požadavků. Včasným odhalením vznikající poruchy a vhodným zásahem lze ušetřit nemalé finanční prostředky, a to nejen předejitím nákladným opravám, ale rovněž vyhnutím se odstavení zařízení z provozu. Je tedy vhodné diagnostikovat zejména stroje s vysokou pořizovací cenou a důležitostí v daném užitém systému.

Z hlediska časového horizontu lze v diagnostickém zkoumání vymezit několik základních termínů týkajících se sledovaného období ve vývoji stavu zařízení.

**Diagnóza** popisuje aktuální technický stav diagnostikovaného objektu, jedná se tedy o posouzení provozuschopnosti zařízení za aktuálních podmínek.

**Prognóza** je předpoklad budoucího vývoje technického stavu objektu a s tím spojeného usouzení např. o pravděpodobnosti výskytu poruch na základě znalosti předchozího života objektu.

**Geneze** představuje rozbor pravděpodobných příčin vzniku poruchy a z toho plynoucího nežádoucího a předčasného zhoršení stavu zařízení.

Technickou diagnostiku lze obecně dělit podle nejrozličnějších kritérií, např. následujícím způsobem [2]:

- 1) Nepřímá a přímá
- 2) Částečná a celková
- 3) Mezioperační, výstupní a provozní
- 4) Souborná a hloubková
- 5) Subjektivní a objektivní
- 6) Závad a poruch a funkční

S vazbou na konstrukci a výrobu elektrotechnických zařízení lze za jeden ze základních vědních oborů spjatých s diagnostikou považovat materiálové inženýrství. To má za úkol zajistit potřebné materiálové prvky pro konkrétní aplikace. Jedná se tedy o náležitou volbu a úpravu materiálů nebo jejich struktur tak, aby splnily kladené požadavky zadání, a tedy vyhovovaly danému účelu. Správný výběr a dodržení mezí materiálů je možno považovat za první krok elektrotechnické diagnostiky. Vhodným šetřením při výrobě je možno odhalit a vyloučit nevyhovující díly nebo jejich části a předejít tak postupu takových součástí do dalšího výrobního procesu. Tímto dochází k přímému omezení výskytu výrobních poruch ve výsledném zařízení, čímž lze docílit značné především ekonomické hospodárnosti. Stejným způsobem můžeme vnímat i diagnostiku již hotového výrobku při výstupní kontrole u výrobce, kdy se opět patřičným šetřením odhalí a minimalizuje počet segmentů s určitou pravděpodobností výskytu poruch a předchází se tak nežádoucím záručním opravám.

Diagnostika se dále zabývá zkoumáním poruch a příčin jejich vzniku při provozu zařízení. Provozní poruchy obvykle odkazují na konstrukčně slabá místa. Zejména z opakujících se poruch je pak možno usoudit na použití jiné, vhodnější části, což znamená cenný poznatek směřující zpět do výroby zařízení. Takto lze odhalit i nedostatky procesu vlastní výroby, ukazují-li se poruchy jako důsledek špatně zvoleného výrobního postupu. Dalším důvodem pro vznik poruch může být např. nevhodné pracovní prostředí, kdy opakující se poruchy signalizují přetěžování vlivem parametrů provozního prostředí. To pak vede na nutné odstranění zátěžného faktoru v místě provozu.

Elektrická zařízení v současné době podléhají dvěma základním aspektům. Prvním aspektem je pořizovací cena stroje, přičemž se vždy požaduje její co možná nejrychlejší návratnost. Druhým aspektem je požadavek na pohotovost zařízení, která je rozhodující pro oblast spolehlivosti a udržitelnosti. Udržitelností pak rozumíme schopnost uvedení zařízení do stavu odpovídajícího původnímu továrnímu stavu provedením údržby. Zajištění a provedení všech výše zmíněných podmínek a předpokladů je důležitou součástí elektrotechnické diagnostiky. [1][4]

## **2.2 Vztah diagnostického systému k diagnostikovanému objektu**

Hlavními prvky v diagnostickém procesu jsou diagnostikovaný objekt a technické prostředky, které objekt diagnostikují. Diagnostikovaným objektem rozumíme celek, který vznikl jako spojení funkčních systémů a subsystémů s vlastní strukturou a je tak centrální částí diagnostického šetření. Na takový objekt během doby života působí celá řada vnějších vlivů – vstupů, a objekt na tyto vlivy reaguje

množstvím reakcí v podobě signálů – výstupů. V podstatě lze tedy zjednodušeně říci, že se diagnostika zabývá kontrolou vstupů a výstupů.

Ze strukturálního hlediska je možno objekty diagnostiky dělit do dvou skupin:

- s nepřístupnou vnitřní strukturou
- s přístupnou vnitřní strukturou

Do první skupiny řadíme takové celky, u nichž je struktura nepřístupná zkoumání a u kterých se tedy nestaráme o vnitřní pochody. Zaujímají nás zde pouze vstupní a výstupní proměnné, které jsou podstatné vzhledem ke správné funkci zařízení, a tedy nesmí vybočovat z požadovaných mezí.

Další skupinou jsou objekty se strukturou přístupnou. Zde je kromě vstupů a výstupů možno zkoumat také dění uvnitř struktury, což může být často užitečné při vyhodnocování jednotlivých poruch.

Diagnostické prostředky jsou takové postupy a přístroje, prostřednictvím kterých lze analyzovat a následně vyhodnotit stav objektu. Zahrnují tedy konkrétní diagnostické metody, algoritmy a měřicí prostředky, které slouží k praktickému provedení metod. Někdy je možno za diagnostický prostředek uvažovat i lidskou obsluhu zařízení.

Během doby života můžeme u diagnostikovaného zařízení s ohledem na provozuschopnost rozeznávat několik stavů. Při **bezporuchovém** stavu systém vykazuje veškeré známky správného fungování a všechny proměnné jsou v požadovaných mezích. Opakem je stav **poruchový**, kdy vlivem poruchy nedochází k plnění funkcí, které jsou na systém kladeny. V případě, že jsou funkce plněny, ale jen v omezeném rozsahu, jedná se o stav **provozuschopný**. Na setrvání objektu v příslušném stavu mají vliv provozní podmínky, za kterých je diagnostikovaný objekt provozován. V případě respektování všech provozních předpisů a zásad údržby zařízení hovoříme o **normálních** provozních podmínkách. V takovém případě nedochází k poruše v důsledku vnějších okolností, ale pouze vlivem vnitřních příčin, zdrojem poruchy tak většinou bývá nevhodná konstrukce nebo nevyhovující zhotovení daného objektu. Pokud dochází k provozu za tzv. **nenormálních** podmínek, znamená to, že nejsou plněny základní provozní předpoklady a původ poruchy tak lze hledat ve vnějších příčinách, tedy obvykle v nesprávné obsluze nebo přístupu k zařízení. Ke zhoršování technického stavu většinou dochází postupně a poruchy mohou být nejrůznějšího charakteru. S ohledem na materiály může k poruchám jednotlivých částí docházet např. v důsledku koroze, adheze, abrazivního, únavového a vibračního opotřebení nebo vlivem deformace, kterou může být třeba trhлина nebo jiné mechanické poškození.

K dělení poruch dochází na dvou úrovních a sice:

1) Podle pravděpodobnosti a rozsahu poruchy:

- a) Úplné a částečné
- b) Náhlé a postupné
- c) Trvalé a dočasné
- d) Náhodné a nenáhodné
- e) Závislé a nezávislé

2) Podle způsobu a místa vzniku:

- a) Konstrukční poruchy
- b) Technologické poruchy
- c) Provozní poruchy

Informaci o aktuálním technickém stavu objektu nám podává diagnostická veličina. Pokud nejsou výstupní proměnné měřitelného charakteru, je nejprve nutné je transformovat do přijatelného tvaru – množiny signálů, odpovídajících množině stavů objektu. Zařízení, které nám umožňuje takovou přeměnu nazýváme **diagnostický systém**. Předpokladem správné funkce diagnostického systému je splnění a respektování základních předpokladů, jako např. volba vhodného diagnostického postupu, znalá a zkušená obsluha zařízení nebo správné zpracování výstupních veličin a vytvoření modelu diagnostického objektu.

S návazností na provozuschopnost je vhodné definovat pojem **údržba objektu**, která s diagnostikou úzce souvisí. Údržba může být trojího charakteru a sice a) údržba dle skutečného stavu objektu b) údržba dle časového plánu c) údržba po poruše. Z hlediska příznivosti je nejhorší variantou **údržba po poruše**, neboť taková situace následuje po havárii spojené s vyřazením objektu z technologického procesu, a tedy ohrožením provozu nebo i zdraví osob. **Údržba dle časového plánu** je často rovněž nevhodnou metodou, jelikož je údržba vykonávána v předem stanovených časových intervalech, které mohou nastat zbytečně brzy, nebo příliš pozdě. S tímto řešením jde ruku v ruce nežádoucí zhoršení parametrů při demontáži a opětovné montáži zařízení. Ideálním kompromisem je **údržba dle skutečného stavu**, které předchází systematické sledování diagnostikovaného objektu a včasné odhalení nepříznivě se měnících parametrů systému na základě průběžné diagnostiky [1] [3] [4] [6].

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tato práce si klade za cíl vytvoření přehledu diagnostiky asynchronního motoru s ohledem na jednotlivé části stroje. Nadále proto nebudou souvislosti uvažovány obecně, ale s konkrétní návazností na asynchronní motor.

## 2.3 Poruchy asynchronního motoru

V dnešní době jsou asynchronní motory jednoznačně nejrozšířenějšími elektromotory v průmyslu. Využívány jsou pak zejména asynchronní motory s kotvou nakrátko vzhledem ke značnému rozsahu možné aplikace, nízké pořizovací ceně a minimálním nárokům na údržbu v důsledku robustní konstrukce. Stejně tak jako všechny ostatní točivé stroje, i asynchronní motory přes svou vysokou spolehlivost podléhají existenci poruch dílčích částí stroje. Obecně lze poruchy vyskytující se v asynchronním motoru rozdělit na poruchy mechanického a elektrického původu. Dále lze poruchy dělit dle příslušné části stroje následovně:

1. Poruchy statoru – poškození izolace vinutí, mezizávitový zkrat, mezifázový zkrat a zkrat jedné či více fází proti zemi, přerušení statorového vinutí
2. Poruchy rotoru – poškození rotorových tyčí nebo zkratovacích kruhů, ohnutí hřídele, excentricita
3. Poruchy ložisek

Jako přibližný ukazatel poruchovosti komponent se v [8] uvádí, že součástí s nejčastějším výskytem poruch v asynchronním motoru jsou ložiska (40 %), dále statorové vinutí (38 %), ostatní součásti – svorkovnice, plechy, chlazení aj. (12 %) a až následně rotor (10 %). Procentuální rozdělení není vždy jednoznačné, jelikož se může lišit u strojů rozdílných svou velikostí, stářím, výkonem, váhou, pracovními podmínkami apod.

Poruchy se ve stroji vždy projevují vznikem nežádoucích harmonických a mezipharmonických (vyšších i nižších než hlavní harmonické), které mají za následek momentové pulsace, snížením dosažitelného momentu stroje, zvýšení ztrát, nebo třeba nadměrné zahřívání.

### 2.3.1 Poruchy statoru

Stator asynchronního stroje je jeho stacionární, nepohyblivá část, která se skládá z nosné kostry, magnetického obvodu, ložiskových štítů a svorkovnice. Kostra může být litinová, svařovaná či hliníková. Statorový magnetický obvod je tvořen vzájemně izolovanými plechy, které jsou ve formě paketu zalisovány v kostře stroje. V drážkách těchto plechů je uloženo statorové vinutí, které bývá obvykle třífázové, ale může mít i jiný počet fází. Začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici, která bývá obvykle umístěna na kostře a slouží k připojení napájení.

Poruchy statoru se v naprosté většině případů týkají statorového vinutí. Nejčastějším zdrojem poruch vzhledem k vinutí je porušená izolace, v důsledku které dochází ke spojení vodičů nakrátko, ať už se jedná o zkrat mezi fázemi, mezi vodiči jedné fáze (mezi závity), nebo zkrat jedné či více fází proti zemi. K poškození



izolace dochází postupně vlivem procesu stárnutí, avšak největší dopad na její životnost mohou mít nežádoucí vnější vlivy.

Tepelné namáhání je nejběžnějším, ale rovněž nejzásadnějším typem vnějšího působení. Při výběru izolace pro konkrétní aplikaci se uvažuje oteplení při jmenovitém zatížení stroje, na které se izolace s ohledem na finanční stránku dimenzuje a které tak nezpůsobuje její nadměrné opotřebení. Při přetěžování stroje však dochází ke zvýšenému ohřevu vlivem průchodu proudu většího, než jmenovitého a izolace je pak rovněž přetěžována. Uvádí se [8], že při nadměrném ohřevu izolace, byť jen o 10 °C, se vlivem tepelného stárnutí snižuje její životnost až o polovinu za současného snížení jmenovitého oteplení, které izolace nadále snese. Z výše popsaného vyplývá, že s ohledem na životnost izolace vinutí je nejnepríznivějším stavem opakovaný rozběh stroje bez průběžného odstavení k dochlazení.

Dalším nežádoucím vnějším vlivem je elektrické namáhání. Obecně lze říci, že z elektrického namáhání je nejzásadnější namáhání přechodovým napětím, které nastává při přechodných jevech a značnou změnou napětí ve velice krátkém čase. V případě stále častějšího užití měničů k tzv. soft-startu dochází na výstupu z měniče k modulaci pravoúhlých napěťových pulsů, jejichž náběh je s ohledem na omezení spínacích ztrát použitých polovodičů co možná nejkratší. Na vstupu do motoru tak mohou vznikat opakované napěťové překmity generované měničem, které, pokud přesáhnou opakovatelnou hodnotu dielektrické pevnosti izolace, mohou rovněž zkrátit její životnost. Obdobná situace je spojena s jistíci prvky motoru, kondenzátory nebo s různými variantami zkratu.

Méně časté je pak namáhání mechanického charakteru, kdy se rotor vlivem poruchy některé dílčí součásti (ložisko, hřídel) střetne se statorem a způsobí tak rozsáhlé poškození obou částí. K porušení celistvosti izolace může rovněž dojít v důsledku nekontrolovatelného pohybu kousku tuhého, např. kovového elementu v případě odlomení z některé vnitřní části stroje.

V případě vniku cizích částic, jako je např. voda, prach apod. se jedná o namáhání vnější kontaminací. Při nedostatečném krytí stroje může docházet ke kondenzaci vody, a tedy vzniku vlhkosti, což nepříznivě působí na izolaci, nebo ke vniku prachových či pylových částic do ložisek, což může způsobit jejich následné zadření. Tomuto namáhání lze částečně předejít vhodným zacházením, dostatečným krytím v dané aplikaci, pravidelnou kontrolou, údržbou a čištěním [13].

#### **2.3.1.1 Mezizávitový zkrat**

V případě vytvoření vodivé cesty mezi sousedními vodiči (závity) jedné fáze, které jsou od sebe za normálních podmínek izolovány, hovoříme o tzv. mezizávitovém zkratu. Tento typ poruchy lze považovat za závit nakrátko, kterým protéká značný proud. Vzhledem ke skutečnosti, že vinutí statoru je uloženo uvnitř

drážek statorového magnetického obvodu, magnetické pole tohoto závitu tedy přímo působí i na ostatní cívky statoru.

Uvažujme nyní mezizávitový zkrat ve fázi A pro motor zapojený do hvězdy. Napěťová rovnice pro fázi A platí ve vztahu

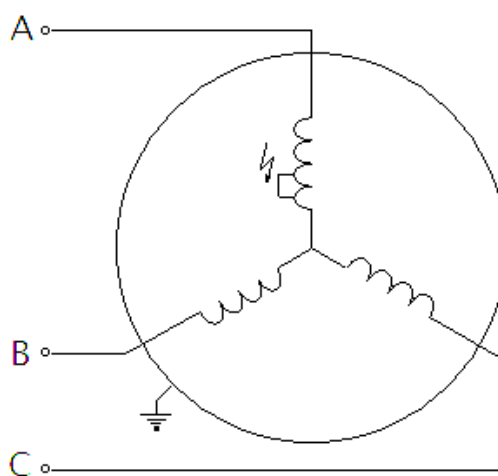
$$u_A = R_A \cdot i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \quad (1)$$

kde  $u_A$  je okamžitá hodnota fázového napětí ve fázi A,  $R_A$  je odpor fáze A,  $i_A$  je proud protékající fází A a  $\psi_A$  je spřažený magnetický tok s vinutím fáze A. Pro spřažený magnetický tok statorové fáze A platí vztah

$$\psi_A = \psi_{sA} + \psi_{rA} \quad (2)$$

kde  $\psi_{sA}$  je složka spřaženého toku způsobena statorovými proudy a  $\psi_{rA}$  je složka způsobená rotorovými proudy.

Závit nakrátko ve fázi A tak bude svým magnetickým polem zeslabovat celkový spřažený magnetický tok  $\psi_A$  fáze A. Důsledkem mezizávitového zkratu je snížení odporu cívky  $R_A$  a zvýšení proudu  $i_A$ , což vede ke změně spřažených magnetických toků mezi jednotlivými fázemi statoru prostřednictvím vzájemných indukčností. Skutečnost je taková, že vlivem nárůstu proudu  $i_A$  a jemu odpovídajícího magnetického pole celkový spřažený magnetický tok v jedné fázi vzroste a v druhé naopak poklesne. Situace nárůstu a poklesu toku může být pro fáze B a C různá, odpovídá sledu fází. Toto oslabení a posílení toku vyplývá z prostorového uspořádání cívek statoru, které jsou vůči sobě posunuty o  $120^\circ$  a vzájemné indukčnosti jsou tak popsány goniometrickými funkcemi. Nadměrný magnetický tok závitu nakrátko ve fázi A kromě zvýšení proudu  $i_A$  zvýší proudy i v ostatních fázích, vlivem magnetických vazeb však dojde v jedné fázi v poklesu (např. fáze B) a v druhé k nárůstu proudu (fáze C).

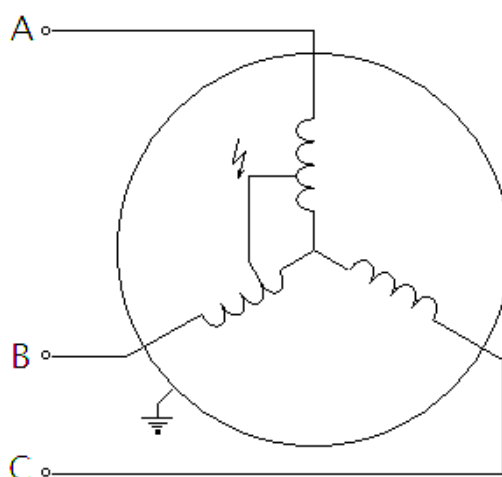


**Obrázek 1. Mezizávitový zkrat jedné fáze statoru ASM**

Obdobně lze popsat rovněž mezizávitové zkraty v ostatních fázích statoru. Tento typ poruchy je nejběžnější a nejrychleji se rozvíjející statorovou poruchou vzhledem k zahřívání závitů nakrátko vlivem poruchového proudu [19].

### 2.3.1.2 Mezifázový zkrat

Mezifázovým zkratem rozumíme vodivé spojení mezi vodiči dvou sousedních fází. Můžeme kupříkladu uvažovat spojení fází A a B u motoru zapojeném do hvězdy, jak je naznačeno na Obrázku 2.



**Obrázek 2. Mezifázový zkrat statoru ASM**

V takovémto případě se částí vinutí fáze A, částí vinutí fáze B a přes uzel motoru uzavírá značný zkratový proud. Na tento stav stroje je možno pohlížet jako na situaci, kdy se na obou poškozených fázích (A, B) vytvořil závit nakrátko. V obou těchto závitech tak vzniká průchodem proudu magnetický tok, který opět různě ovlivňuje proudy v okolních fázích. Výsledné působení mezifázových zkratů je tedy velice podobné působení, které již bylo nastíněno pro mezizávitové zkraty. Situace mezifázového zkratu je však značně složitější, neboť jednotlivé mezizávitové zkraty mohou vykazovat různou velikost proudu a působení jejich magnetických toků tak může mít rozdílný charakter.

Na výsledný dopad mezifázového zkratu má značný vliv místo vzniku zkratu v obou fázích vzhledem k poloze uzlu. V tomto ohledu mohou nastat celkem tři stavy:

1. Místa vzniku zkratu jsou vůči uzlu motoru pro fázi A i B v přibližně stejné vzdálenosti ( $A=B$ )
2. Místo zkratu fáze B je k uzlu motoru blíže než místo zkratu fáze A ( $A>B$ )
3. Místo zkratu fáze A je k uzlu motoru blíže než místo zkratu fáze B ( $B>A$ )

V případě  $A=B$  se budou spřažené toky obou závitů nakrátko rovnat ( $\Psi_{kA}=\Psi_{kB}$ ) a dá se tedy očekávat, že bezprostředně po vzniku zkratu mezi fázemi budou obě fáze protékány proudy shodné velikosti. Tyto proudy však budou nabývat výrazně vyšších hodnot, než jak by tomu bylo u zdravého stroje. Vzhledem k tendencím mezizávitových zkratů odvozených na konci předchozí kapitoly lze říci, že spřažený tok  $\Psi_{kA}$  bude působit proti proudu ve fázi B a zároveň bude posilovat proud ve fázi C. Tok  $\Psi_{kB}$  pak bude působit opačně, tedy potlačí proud ve fázi C a současně zvýší hodnotu proudu ve fázi B. Je zřejmé, že vliv na fáze B a C spřažených toků jednotlivých závitů se navzájem ruší, ale oba tyto toky posilují proud ve fázi A. Vzhledem ke skutečnosti, že proud  $i_B$  je poruchovým proudem a má tedy vyšší hodnotu než proud  $i_C$ , bude výsledná bilance proudů vypadat následovně  $i_A > i_B > i_C$ .

Pro situaci  $A > B$  platí, že spřažený tok závitů nakrátko fáze A má silnější účinky než závit fáze B, tedy  $\Psi_{kA} > \Psi_{kB}$ . Princip vzájemného ovlivnění zůstává stejný jako v předchozím odstavci, výraznější tok  $\Psi_{kA}$  však proud  $i_B$  sníží a proud  $i_C$  posílí významněji. Oba toky pak způsobí vzrůst proudu  $i_A$  a proudová bilance bude mít tvar  $i_A \gg i_B \geq i_C$ . Velikost proudů  $i_B$  a  $i_C$  se bude odvíjet od velikosti vzájemných indukčností a charakteru zkratu.

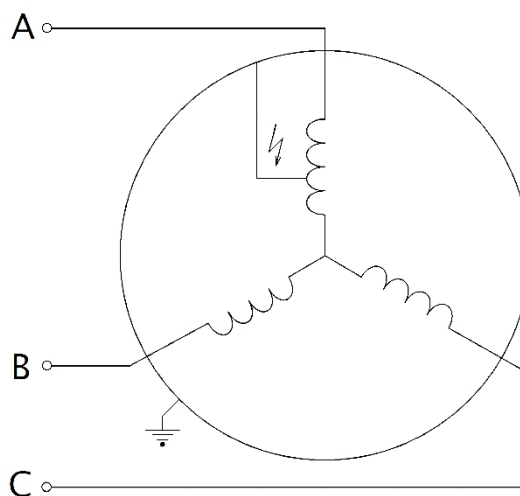
Pokud nastane stav  $B > A$ , potom mezi spřaženými toky závitů platí nerovnost  $\Psi_{kB} > \Psi_{kA}$ . To znamená, že v tomto případě má tok  $\Psi_{kB}$  výraznější vliv než tok  $\Psi_{kA}$  a tedy dojde ke značnému nárůstu proudu  $i_B$  a snížení proudu  $i_C$ . Oba toky pak opět způsobí zvýšení proudu  $i_A$ . Pokud bude místo zkratu fáze B výrazně vzdálenější od uzlu než místo zkratu fáze A, pak proud  $i_B$  bude rovný nebo i vyšší než proud  $i_A$ . Pro proudy bude platit  $i_B \geq i_A > i_C$ .

Velikost jednotlivých proudů v podstatě vždy závisí na charakteru a místě zkratu. Z již popsaného však vyplývá, že pro zkrat mezi fázemi A a B bude hodnota proudu ve fázi A většinou největší a proud ve fázi C nejmenší. Proud  $i_B$  by mohl přesáhnout hodnotu  $i_A$  pouze v případě velmi vysokých zkratů. Dá se však předpokládat, že v takovém případě bezpodmínečně zareaguje tepelná ochrana stroje.

Obdobně lze analogicky odvodit i vztahy mezi veličinami pro zkraty mezi jinými dvěma fázemi [19].

### 2.3.1.3 Zkrat fáze proti zemi

Situace zemního zkratu je patrná na Obrázku 3. Tato porucha má na fungování stroje zcela odlišný vliv než závitové zkraty ve statorovém vinutí. Zatímco vznik závitového zkratu způsobí průtok značného proudu, zemní zkraty mimo jiné u motoru zapojeného do hvězdy způsobí posunutí uzlu stroje. Přestože nárůst napájecího proudu při zemním zkratu může být výrazně vyšší než při zkratu závitovém, poškozené vinutí bývá při zkratu na zem namáháno podstatně menším proudem.



**Obrázek 3. Zemní zkrat statorového vinutí ASM**

Stejně jako všechny ostatní typy zkratů, i zemní zkraty mohou vzniknout v libovolném úseku vinutí a způsobit tak bezprostřední odstavení stroje [19].

#### **2.3.1.4 Posouzení stavu izolace**

Důležitým faktorem pro posouzení stavu izolace je tzv. elektrická elasticita. Při přiložení stejnosměrného napětí k měřenému vinutí se náhodně uspořádané molekuly izolačního materiálu začnou nastavovat vzniklému elektrickému poli. Rychlost tohoto natáčení je dána jakostí izolace. V případě, že je již izolace na pokraji své životnosti, nemusí se molekuly natáčet a v postiženém místě izolace dojde lokálně ke vzniku silnějšího elektrického pole, které může vést k mikroprůrazům. Obdobně je tomu i u napětí střídavého, kdy se molekuly izolace nestíhají natáčet elektrickému poli, které během jedné vteřiny stokrát změní svou polaritu. V praxi lze tento jev odhalit např. vysokonapěťovou zkouškou stejnosměrným napětím. Zmíněná zkouška vychází z předpokladu, že po přiložení stejnosměrného napětí začne hodnota izolačního odporu ( $R_I$ ) růst až do ustálené hodnoty. V případě vadné izolace pak nemusí izolační odpor růst, nebo ani nedosáhne minimální požadované hodnoty. Prakticky by se izolační odpor vinutí proti kostře měl pohybovat v řádu  $>1 \text{ G}\Omega$ .

Dalším faktorem hodnocení izolace je polarizační index (PI). Jak již bylo zmíněno, po přiložení napětí by měl izolační odpor jakostní izolace růst, respektive proud klesat až do ustálené hodnoty, která vyjadřuje izolační schopnost vinutí. K měření izolačního odporu dochází většinou v intervalu deseti minut, přičemž se změří hodnoty proudu a odporu v čase jedné minuty ( $R_{I1}$ ) po přiložení napětí a na konci měření, tedy po deseti minutách ( $R_{I10}$ ).

$$PI = \frac{R_{I10}}{R_{I1}} \quad (3)$$

Poměr  $R_{I10}/R_{I1}$  je označován jako polarizační index. Minimální přípustnou hodnotou polarizačního indexu je  $PI > 2$ .

Pokud se při měření zjistí hodnota polarizačního indexu menší než dva, je vhodné následně změřit i tzv. poměr dielektrické absorpce (DAR). DAR je vyjádření stejného poměru jako PI, avšak po sobě jdoucí hodnoty izolačního odporu se zaznamenávají ve výrazně kratších intervalech, obvykle po třiceti vteřinách. Dielektrická absorpce pak udává poměr

$$DAR = \frac{R_{I1}}{R_{I0,5}} \quad (4)$$

Minimální hodnota dielektrické absorpce je  $DAR > 1,25$

Jak pro polarizační index, tak pro dielektrickou absorpci platí, že čím vyšších hodnot tyto ukazatele dosahují, tím je izolace vinutí v lepším stavu [7] [30].

## 2.3.2 Poruchy rotoru

Rotor asynchronního stroje sestává z hřídele, na něm nalisovaných vzájemně izolovaných plechů, které tvoří rotorový magnetický obvod, a vinutí. Rotorové vinutí může být navinuto v drážkách, obdobně jako stator, a vyvedeno na kroužky. Taková konstrukce bývá označována jako vinutá kotva. Obecně častěji se namísto vinutého rotoru využívá rotor s klecovou konstrukcí, tvořený obvykle hliníkovými tyčemi, které se na koncích trvale spojují pomocí zkratovacích kruhů. V případě motorů vyšších výkonů se tyče a kruhy většinou vyrábějí z mědi. Tyto tyče jsou pak rovněž vnořeny v drážkách plechů na hřídeli stroje. Vzhledem ke stavbě rotoru může dojít k poruše vlivem ohnutí nebo vyosení hřídele, tzv. excentricity, dále pak k poškození rotorových vodičů nebo zkratovacích kruhů.

### 2.3.2.1 Poruchy rotorových tyčí a zkratovacích kruhů

Rotorové tyče spojené čelními kruhy tvoří mnohofázové zapojení do hvězdy, kde každá tyč tvoří samostatnou fázi. Napětí na jednotlivých tyčích spolu tvoří symetrickou fázorovou hvězdicí. V důsledku tohoto napětí tečou klecí proudy, které spolu vytvářejí opět symetrický systém proudu. Při rozběhu asynchronního motoru prochází strojem velký záběrný proud (běžně až  $8I_n$ ), přičemž jsou jednotlivé části rotoru značně namáhány. Vnitřní elektromagnetická síla, kterou soustava na rotor působí, je přibližně dána vztahem

$$F_{im} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot l}{b} \cdot i^2 \quad (5)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $l$  je délka vodiče,  $b$  je šířka drážky, a  $i$  je proud protékající vodičem.

Příčinou vzniku poruchy může být použití nekvalitních materiálů, časté přetěžování nebo těžké rozběhy. V případě rotorových tyčí může vlivem poruchy dojít ke zvýšení odporu tyče, nebo pak k jejímu úplnému ustřižení a přerušení proudovodné dráhy. V takové situaci magnetické pole generované rotorovými proudy přestává být symetrické a ovlivňuje výsledné magnetické pole ve vzduchové mezeře stroje, které se tímto deformuje. Následkem deformace magnetického pole jsou změny elektrických, elektromechanických, tepelných a akustických veličin. Poruchy rotorových tyčí jsou doprovázeny především zhoršením a prodloužením rozběhu motoru, tvorbou parazitních momentů a zvýšeným tepelným namáháním nepoškozené části vinutí, jelikož se při poruše celkový proud rozdělí mezi tyče nerovnoměrně. Proud, který by tekla do porušené tyče, začne protékat dvěma okolními tyčemi, čímž je více zatíží a může tak dojít k poškození dalších tyčí.

V každé fázi statoru se vlivem magnetického pole v mezeře budí proud  $i_s$ , který je pro každou fázi posunutý o patřičný úhel a který se uzavírá přes napájecí síť [22].

### 2.3.2.2 Poruchy spojené s excentricitou

Excentricitou rozumíme nestejnorožnost vzduchové mezery mezi statorem a rotorem v důsledku některé z následujících příčin – a) vychýlení hřídele způsobené nedokonalým spojením s poháněným zařízením b) nesouosé umístění rotoru vůči statoru c) opotřebení ložisek a s tím spojené vychylování rotoru d) provoz nad kritickou hodnotou otáček. V případě výrazné excentricity mohou výsledné radiální síly (nevyvážený magnetický tah) způsobit tření rotoru o stator, což vede ke značnému poškození stroje. Ačkoliv by bylo z hlediska spolehlivosti a výkonu výhodné, kdyby se ve stroji nevyskytovala žádná excentricita, ani v dnešní době nelze vyrobit tvarově naprosto dokonalá tělesa a existenci excentricit, třebaže jen minimálních, se tedy nelze zcela vyhnout. Uvádí se [10], že až v 10 % případů dochází ke vzniku excentricity, vyšší než přijatelné, již ve výrobním procesu. Pro správné fungování stroje je tak žádoucí, aby se osa rotoru co možná nejvíce shodovala s osou statoru. Excentricity dělíme na statickou, dynamickou a smíšenou.

**Statická excentricita** spočívá ve vyosení osy otáčení rotoru vůči hlavní ose statoru (viz. Obrázek 4b), čímž ve stroji vznikne nerovnoměrnost délky vzduchové mezery. Taková situace způsobí, že v místě kratší vzduchové mezery dochází k silnějšímu vzájemnému působení magnetických polí statoru a rotoru, což se projeví vznikem tzv. postranních pásem posunutých oproti frekvenci sítě  $f_1$  o synchronní frekvenci otáčení  $f_{synch}$

$$f_{se} = f_1 + f_{synch} = f_1 + \frac{f_1}{p} \quad (6)$$

Statická excentricita se také projevuje při hodnotě dvojnásobku frekvence sítě. Tento stav je však obvykle problematické diagnostikovat, neboť se jedná o druhou harmonickou síťové frekvence [15]

$$f_{stat} = 2 \cdot f_1 \quad (7)$$

**Dynamická excentricita** je stav, kdy je rotor vychýlen z původní osy rotace, ale má tendenci otáčet se symetricky vzhledem k hlavní ose statoru (viz. Obrázek 4c). Délka vzduchové mezery pak není funkcí pouze polohy rotoru, ale také času, jelikož se tato proměnlivá délka mezery mění s rychlostí otáčení rotoru.

Pro dynamickou excentricitu platí [15]

$$f_{dyn} = f_1 \pm (1 - s) \cdot f_{synch} \quad (8)$$

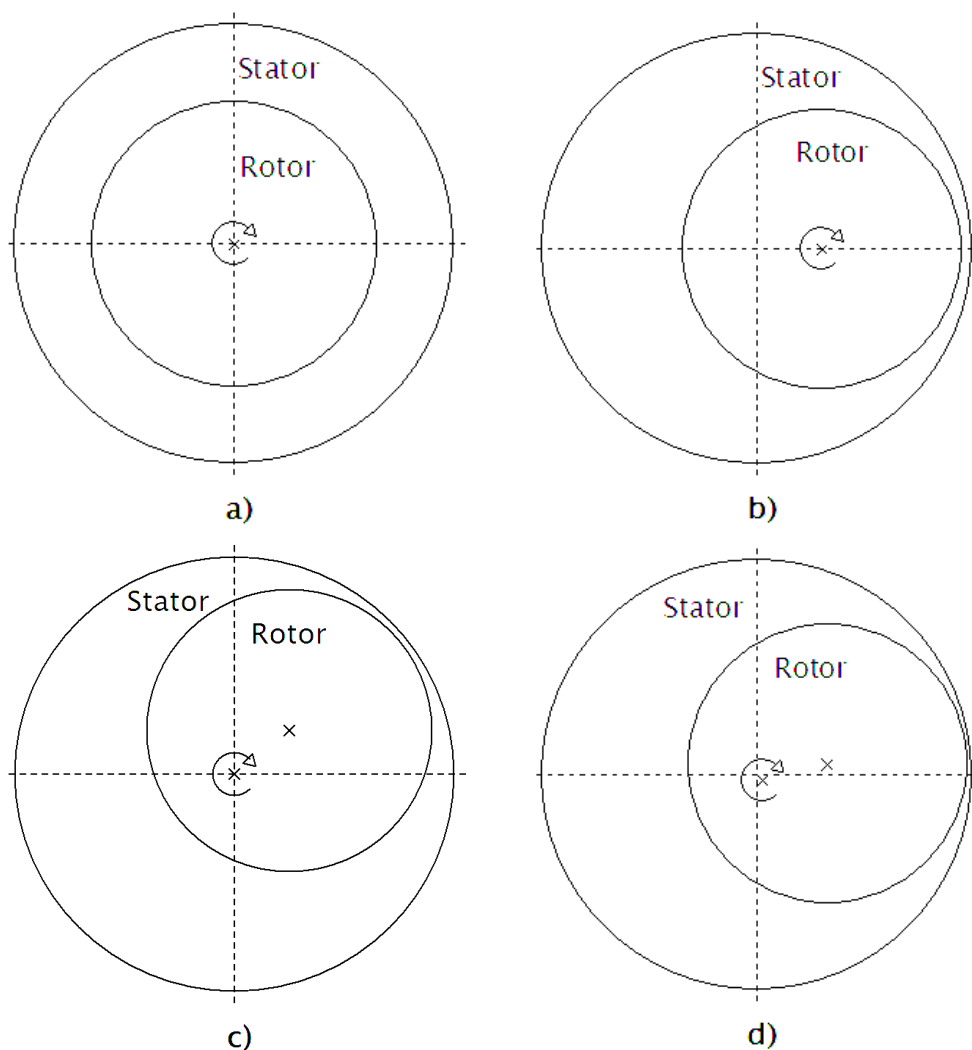
**Smíšená excentricita** je kombinací obou výše zmíněných excentricit, tedy dochází k vychýlení rotorové osy otáčení z hlavní osy statoru v důsledku statické excentricity a zároveň k vychýlení hmoty rotoru vůči statoru v důsledku excentricity dynamické (viz. Obrázek 4d).

Frekvenční složky způsobené excentricitami lze podle [22] obecně získat pomocí následujícího vztahu

$$f_{exc} = \left[ (k \cdot Q_R \pm k_d) \cdot \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm n \right] \cdot f_1 \quad (9)$$

kde  $n$  je pořadí harmonické;  $k$  je celočíselný součinitel;  $Q_R$  je počet drážek rotoru-tyčí;  $k_d$  je koeficient zohledňující typ excentricity a platí, pro statickou excentricitu  $k_d=0$ ; pro dynamickou excentricitu  $k_d=1, 2, 3$ ;  $s$  je skluz a  $p$  je počet pól-párů [11].





**Obrázek 4. Typy excentricit vzduchové mezery a) bez excentricity b) statická excentricita; c) dynamická excentricita; d) smíšená excentricita**

### 2.3.3 Poruchy ložisek

Točivé elektrické stroje ke snížení tření a hluku při otáčivém pohybu hřídele využívají ložisek. Ložiska se dělí na kluzná, valivá a magnetická. Nejčastěji užívaná jsou valivá ložiska a zejména pak ložiska kuličková. Kuličkové ložisko se skládá z vnějšího a vnitřního kroužku, klece a valivých elementů – kuliček. Všechny tyto části, tedy vyjma kuličkové klece, podléhají degradaci opotřebením materiálů a působením vnějších vlivů. Jako vnější vlivy můžeme uvažovat vnitřní pnutí nebo vibrace. Mezi původce ložiskových poruch lze považovat ložiskové proudy nebo mechanické namáhání při otáčivém pohybu.

Ložiskové proudy vznikají v důsledku existence hřídelových napětí buďto mezi konci hřídele nebo napětí hřídele proti zemi. Aby mohly proudy ložiskem procházet, je nutné překonat určitou mezní hodnotu napětí, při které dojde

k průrazu vrstvy maziva uvnitř ložiska (dle [9] je empiricky zjištěná mez průrazného napětí maziva 0,9 V). Napětí na hřídeli může být vyvoláno několika způsoby – a) indukcí střídavou složkou pulsujícího magnetického pole při nesymetrickém třífázovém napájení b) nesymetrickým elektrickým či magnetickým obvodem c) statickým nábojem na rotoru u jistých soustrojí (turbíny, kompresory) d) vlivem nevyhovující izolace nebo e) z důvodu velké strmosti statorového napětí v čase, kdy se mezi částmi stroje nebo mezi strojem a zemí zformují parazitní kapacity, na kterých se vlivem častých napěťových změn objevuje napětí. Zejména poslední zmíněný způsob je v dnešní době velmi aktuální z důvodu častého napájení asynchronních motorů z polovodičových měničů.

Proudy v ložisku obvykle ložisko poškodí v místě styku mezi valivými tělisky a oběžnými drahami vnitřního a vnějšího kroužku, což se projeví akusticky zvýšením hluku. Zjištění přesného důvodu, v jehož důsledku došlo ke zhoršení stavu ložisek, je velice náročné a podléhá často mikroskopickému šetření.

Další možnou poruchou ložisek bývá mechanické opotřebení materiálů kuliček nebo vnitřního a vnějšího kruhu v důsledku otáčení rotoru [8][9].



**Obrázek 5. Části valivého kuličkového ložiska [14]**

## **2.4 Diagnostika asynchronního stroje**

Diagnostika každého zařízení s sebou nese určitá specifika a jinak tomu není ani u asynchronních motorů. Vzhledem k rozdílným konstrukcím jednotlivých typů točivých strojů se poruchy projevují různě a z toho rovněž vyplývají odlišné způsoby detekce těchto poruch.

## **2.4.1 Systém on-line a off-line**

V závislosti na způsobu provedení diagnostického šetření rozlišujeme dva základní typy – on-line (v provozu, funkční diagnostika) a off-line (mimo provoz, testovací diagnostika).

### **2.4.1.1 Diagnostika on-line**

Při on-line diagnostice se využívá skutečnosti, že diagnostikovaný objekt zůstává zapojen do pracovního procesu a je tedy možno systém zkoumat z hlediska jeho dynamiky. Pro on-line diagnostiku je vhodná integrace senzorů do vnitřku motoru, které nám umožňují kontinuálně či periodicky snímat požadovaná data a okamžitě vyhodnocovat stav stroje. Zařízení sloužící k on-line vyhodnocování stavu objektu již bývají obvykle automatizovaná, uživatel tedy dostává přímo výsledné informace o stavu zařízení. Provozní diagnostiky se využívá k odhalení mechanických anomálií jako jsou poruchy rotoru nebo jiných dynamických komponentů. K detekci se obvykle využívá rozboru magnetického pole ve vzduchové mezeře (které se v důsledku poruch deformuje), vibrací, statorového proudu atd. Je tedy možno odhalit jakoukoliv závadu, která má za následek vytvoření specifického podpisu v dané veličině, tedy v jejím časovém průběhu. On-line diagnostika se tak využívá převážně k odhalení poruch jako jsou excentricity, uvolněné statorové vinutí, poškozené rotorové tyče a ložiska [12] [13].

### **2.4.1.2 Diagnostika off-line**

K off-line diagnostice dochází buďto při poruše nebo při odstavení stroje k údržbě. Diagnostika mimo provoz se využívá ke statickému zkoumání komponentů jako jsou statorové a rotorové vinutí stroje. Testování může probíhat při napájení vysokým i nízkým napětím a jde většinou o odhalení zvýšeného odporu (např. rotorových tyčí při poruše), nevyhovujícího styku nebo poškození dílčích částí, jako jsou vodiče v drážkách. Odhalit lze rovněž sníženou izolační schopnost. Výraznou nevýhodou off-line diagnostiky je vyřazení stroje z pracovního procesu, přičemž není možné objekt testovat za aktuálních podmínek, za kterých stroj jinak pracuje. Naproti tomu platí, že off-line diagnostika je do jisté míry věrohodnější, neboť výsledky on-line diagnostiky mohou být zkresleny provozními faktory jako např. síť, zátěž atd. [12] [13].

### **2.4.1.3 Samostatná diagnostická zařízení a inteligentní motory**

V současné době se k diagnostice běžně využívají univerzální zařízení, která umožňují samostatné snímání a vyhodnocování dat. K takovému určování aktuálního stavu je však nutná přítomnost měřící elektroniky uvnitř zkoumaného stroje. Motory standartního provedení, avšak se zabudovanými senzory, jsou

obvykle označovány jako inteligentní motory – umožňují samočinnou on-line diagnostiku. Výhodou integrace senzorů již při výrobě je skutečnost, že senzory mohou být předem umístěny do ideální polohy vzhledem k včasnému odhalení poruchy. V některých případech může přímo výrobce stroje nabízet i automatizovaná měřicí zařízení k vyhodnocování stavu. V takovém případě rovněž odpadá komplikované nastavování proměnných v diagnostických algoritmech, neboť ty bývají již přednastaveny výrobcem stroje. Pro možnost provedení kompletní diagnostiky asynchronního motoru je pak vhodné umístit do vnitřku stroje senzory k měření např. oteplení vinutí na statoru, statorových proudů a napětí, a vibrací na ložiskách. Je zřejmé, že inteligentní motory jsou snadno a vhodně diagnostikovatelné, nicméně jejich významnějšímu rozšíření brání vysoká pořizovací cena, která odrazuje uživatele, a v důsledku tedy i výrobce [17].

## **2.4.2 Metodika diagnostiky asynchronního motoru**

Postup téměř každé metody užívané k diagnostice asynchronního motoru, ať už se zabývá detekcí kterékoliv poruchy, je možno obecně rozdělit do následujících třech kroků [18]

1. Měření a předzpracování signálu diagnostické veličiny
2. Generování diagnostických příznaků
3. Vyhodnocení příznaků a vytvoření diagnózy

### **2.4.2.1 Měření a předzpracování signálu**

K získání diagnostického signálu se využívá různých snímačů, které transformují diagnostickou veličinu (napětí, proud, vibrace, teplota) na měřitelný signál elektrického charakteru. Elektrický signál se po naměření většinou filtruje a digitalizuje pomocí převodníku. Takto předzpracovaný signál se následně využije jako vstup ke tvorbě diagnostických příznaků.

### **2.4.2.2 Generování diagnostických příznaků**

Diagnostické příznaky je možno vytvářet několika na sobě nezávislými způsoby – a) prostřednictvím rozboru signálů, b) použitím diagnostických modelů nebo c) na základě heuristické informace.

#### **a) Určení příznaků poruch na základě rozboru signálů**

Nejčastěji užívanou metodou k určování diagnostických příznaků je rozkládání diagnostických veličin, naměřených během provozu stroje, do frekvenčního spektra. Jak již bylo zmíněno, obvykle se k rozkladu do spektra využívá naměřených statorových napětí, proudů, magnetického toku ve vzduchové mezeře nebo vibrací. Pomocí frekvenčního rozkladu lze odhalit poruchy elektro-

magnetického i mechanického charakteru a rovněž nesymetrii elektrického či magnetického obvodu. Popsané nežádoucí stavy se ve spektru projevují vznikem tzv. podpisů (signatures) o určité magnitudě (tj. amplitudě ve frekvenčním spektru) na příslušné hodnotě frekvence. Každá porucha pak dává vzniknout podpisu na jiné hodnotě frekvence a o jiné amplitudě čili je možné od sebe jednotlivé poruchy rozlišit. Spektrální rozklad je možno provádět on-line, diagnostický systém negeneruje testovací signál, ale pouze využívá již existující veličiny při chodu stroje. Další variantou je sběr signálu za chodu stroje a následné převedení z časové oblasti do oblasti frekvenční pomocí vhodného softwaru [17] [18].

## **b) Určení příznaků poruch s použitím diagnostického modelu**

Mnoho diagnostických metod využívá algoritmů založených na tvorbě diagnostických příznaků poruch prostřednictvím modelů. Takové metody vycházejí z komparace dat poskytnutých reálným diagnostikovaným objektem a jemu odpovídajícím modelem.

Ačkoliv je možno na diagnostikovaný objekt nahlížet různě a aplikovat na něj velké množství diagnostických metod, vždy je nutné začít několika základními kroky. Nejdříve je vhodné se seznámit s analyzovaným objektem a získat tak informace o jeho struktuře a podmínkách provozního prostředí. Z takových znalostí pak lze vyvodit přibližný diagnostický model, který je vhodný jednak ke studiu vnitřní struktury a jednak z hlediska možnosti simulovat zkoumané, většinou poruchové situace, které by jako experiment mohly být v některých případech velice nákladné nebo jinak nerealizovatelné. Modelování lze tedy chápat jako zjednodušení zobrazení původního objektu prostřednictvím modelu, sloužícího k usnadnění popisu jinak komplikovaného originálu. K tvorbě modelu složitějšího systému je vhodné přistupovat systematicky, to znamená nejprve modelovat jednotlivé submodely odpovídající konkrétním subsystémům a z nich následně sestavit příslušný systém. Výhodou takového přístupu je nejen dobrý popis složitějších celků, ale rovněž možnost rozdělení systému na subsystémy bez poruch a s poruchami.

Diagnostické modely lze podle podstaty vyjádření dělit na fyzikální a matematické. Fyzikální modely jsou hmotné entity, které s modelovaným originálem mají stejný fyzikální nebo jiný analogický princip. Naproti tomu matematické modely jsou spíše hypotetického charakteru a výstupní veličiny diagnostikovaného objektu zpravidla popisují soustavou rovnic a nerovnic a v tomto směru se dále dělí na modely analytické, logické a topologické.

Vhodnost užití konkrétního modelu a způsobu zpracování se volí na základě dostatečné znalosti diagnostikovaného objektu a povahy měřitelných veličin [4] [5] [16].

### **c) Generování příznaků poruch na základě heuristické informace**

Další důležitou skupinou diagnostických příznaků jsou příznaky vytvořené na základě heuristické informace, tzn. informace obstarané lidským operátorem, který pravidelně přichází s diagnostikovaným objektem do styku. Operátor obvykle zná historii stroje a provozní podmínky, bývá tak zpravidla prvním, který je na základě lidských smyslů schopen vypožorovat změnu chování stroje (zvýšení úrovně hluku, vibrací, teploty, zápachu apod.). Na jeho popud pak může dojít ke včasné diagnostice zařízení a k předejití havárii [17].

### **2.4.3 Často užívané diagnostické metody ASM**

Vhodná metoda musí být schopna poruchy detekovat hned v zárodku, aby bylo možno jednotlivé vady odhalit včas a předejít tak kolizi stroje. Je nutné, aby veličiny vybrané k diagnostice vykazovaly výraznou změnu i při nepatrných poruchách. Signály, které se při existenci poruchy mění jen velmi nepatrně tedy nejsou pro diagnostiku dané poruchy vhodné.

Pro zpracování či vyhodnocení signálu je vždy důležité použít zařízení s co možná nejvyšší přesností, avšak je vhodné při šetření dávat přednost takovým signálům, které ke zpracování nepotřebují příliš vysokou přesnost a které poruchu vždy spolehlivě indikují.

Metod či způsobů diagnostiky jednotlivých poruch asynchronního stroje existuje nespočet. Každá metoda má pak svá specifika, a tedy i různé využití. Základní rozdělení diagnostických metod vyplývá z místa vzniku dané anomálie a sice na metody diagnostikující poruchy

1. satorové
2. rotorové

Existují ovšem komplexní postupy, které se dají využít k současnému odhalení jak satorových, tak i rotorových poruch. Příkladem takové diagnostické metody může být třeba analýza vibrací, analýza magnetického toku ve vzduchové mezeře nebo podpisová analýza satorových proudů. Tyto zmíněné postupy se řadí k on-line diagnostice a vzhledem k rozsahu odhalitelných poruch jsou pro praktické účely velice vhodné a často využívané. Nejrozšířenějším způsobem identifikace poruch je prostřednictvím rozboru spektra vibrací, tato metoda je však poměrně finančně nákladná (drahé akcelerometry) a tedy není vždy vhodná. Naproti tomu podpisová analýza proudů je jednoduchou a lacinější metodou, která je při dobré znalosti systému schopna podávat poměrně jasné a přesné výsledky [22].

#### 2.4.3.1 Metody diagnostiky statorových poruch

Statorové vady je možno odhalit různými způsoby, mezi něž patří např. měření magnetického toku, měření oteplení, monitorování statorových proudů, vibrací či sledování stavu izolace vinutí.

Jak již bylo zmíněno dříve, většina poruch zanechává stopy vlivem deformace magnetického pole ať už uvnitř, nebo vně stroje. Na této skutečnosti je postavena metoda použití vnitřního nebo vnějšího magnetického senzoru, někdy též označovaná jako tzv. **vyhledávací cívka**. Nejčastěji užívaným typem senzorů k měření uvnitř stroje je sada miniaturních Hallovyh sond (Hall Effect Flux Sensor – HEFS), umístěných do vzduchové mezery. Asynchronní stroje nižších výkonů mívají vzduchovou mezeru zřídka kdy přesahující délku 1 mm a použití senzorů by tak bylo problematické. Stroje s výkonem v řádech MW pak mívají délku mezery obvykle 2-3 mm. Je vhodné mít na zřeteli, že u motorů malých výkonů s nízkou pořizovací cenou se obvykle nevyplatí provádět diagnostiku pomocí Hallovyh senzorů vzhledem k finanční nákladnosti této metody. Hallovy sondy zachycují hustotu magnetického toku v mezeře, do něhož se promítají příspěvky toků od jednotlivých fází. Výsledkem je tedy obvykle kvazi-sinusový průběh magnetického toku. Vlivem statorové asymetrie v důsledku závitových zkratů vinutí dochází ke zvýšení axiálního magnetického toku, a tedy k jisté deformaci výsledného magnetického toku ve vzduchové mezeře

**Vnější senzor magnetického toku** je obvykle umístěn na vnější povrch kostry stroje a využívá se k měření rozptylového toku. Rozptylový tok je část celkového indukčního toku, který se uzavírá mimo magnetický obvod a nepodílí se tak na tvorbě momentu stroje. Únik axiálního magnetického toku mimo stator existuje jako důsledek vzniku magnetického pole v okolí vodičů statorového vinutí. Rozkladem průběhu takto změřeného toku je opět možno usoudit o statorových poruchách v případě existujících deformací.

Dalším způsobem odhalení možných statorových poruch je metoda **sledování teplot** uvnitř stroje. Zkratky statorového vinutí obecně zapříčiňují průchod proudů větších hodnot než jmenovitých, což má za následek nadměrné zahřívání. Teploty vyšší, než které jsou pro stroj přípustné, mohou způsobit trvalé poškození. V případě zkratů dochází k lokálnímu ohřevu v místě vzniku a v některých případech i k postupnému rozšiřování poruchy, je tedy důležité teploty ve stroji sledovat systematicky. Některé literární zdroje jako alternativní způsob monitorování teplot uvádějí možnost simulace na bázi modelů prostřednictvím metody konečných prvků nebo soustředěných parametrů.

K odhalení statorových poruch je rovněž možno použít metodu **částečných výbojů**, která staví na principu kontroly stavu izolace. Jinými slovy se tato metoda zabývá sledováním možného vzniku elektrických pulsů (výbojů) po dielektrickém

povrchu izolačního systému. Částečné výboje se ve stroji vyskytují jako důsledek nedokonalostí izolace nebo třeba nevhodně zvoleného výrobního procesu, který může zapříčinit vznik anomálií jako jsou trhliny nebo vzduchové kapsy. Lze říci, že tato metoda je pro diagnostiku statorových poruch jedna z nejvhodnějších, na druhé straně má však vysoké nároky v podobě nutné analýzy materiálů, elektrických polí, obloukových charakteristik apod.

Obecně vhodnou a poměrně jednoduchou metodou pro zjištění statorových poruch je potom měření izolačního odporu, polarizačního indexu a dielektrické absorpce [8].

#### 2.4.3.2 Metody diagnostiky rotorových poruch

K diagnostice poruch rotoru se často přistupuje pomocí on-line metod většího rozsahu, jako je například podpisová analýza proudu. Jakkoliv je tato metoda univerzální a obecně vhodná, faktem zůstává, že v některých případech nemusí podávat naprosto exaktní výsledky. Zejména v případě stroje s často se měnící zátěží, nebo pracujícího jen při velmi nízké skluzové frekvenci, není podpisová metoda dostatečně vhodná. V některých konkrétních případech dokonce podpisová analýza podává falešné poruchové indikace, např. při nízkofrekvenční oscilaci zátěže, při magnetické anizotropii rotorového jádra apod. Při zkoumání rotorových poruch je pak možno použít doplňkové off-line testování, kdy je rotor vyjmut ze stroje a podroben samostatnému zkoumání. Takto získané výsledky jsou v podstatě nezpochybnitelné, neboť důsledek rotorových vad je pozorován přímo a není ničím ovlivněn. Nevýhodou zůstává nutné odstavení a rozložení stroje. Je tedy zřejmé, že takovéto testování je možné pouze při periodických odstávkách za účelem kontroly, nebo jako ověření v případě alarmujícího zjištění pomocí on-line metod. O poznání příznivější je potom **nízkonapěťové jednofázové rotační testování**, které nevyžaduje mechanické rozložení stroje. K takovému zkoumání se využije jednofázový napěťový zdroj s hodnotou dodávaného napětí přibližně  $\frac{1}{4}$  nebo  $\frac{1}{8}$  jmenovitého napětí stroje. K pólům zdroje jsou potom připojeny dvě fáze motoru. Za manuálního otáčení rotoru je měřen proud ke zjištění rotorových závad. Proud u zdravého stroje by měl vykazovat konstantní hodnotu, v případě asymetrie potom hodnota proudu kolísá [21].

Vzhledem ke skutečnosti, že při rozběhu asynchronní stroj odebírá několikanásobek jmenovitého proudu, hodí se tato situace k detekci některých konkrétních vad, např. porušených rotorových tyčí. Jak již bylo zmíněno, při provozu s nízkou zátěží se postranní pásma indikující poruchu tyčí neprojeví, nebo se projeví velice nepatrně. Důležitou výhodou je, že záběrný proud je výrazně méně citlivý na velikost zátěže, než jak tomu bývá u proudu za provozu motoru. Zmíněná fakta tvoří základní princip metody nazvané **on-line sledování rozběhu stroje**, která se tedy zabývá měřením proudu při rozběhu motoru. Nevýhodou této metody je skutečnost,



že k měření dochází pouze při rozběhu, a tedy je toto měření poměrně krátké a časově omezené. Trvání rozběhu asynchronního motoru se v závislosti na setrvačnosti a velikosti zátěže pohybuje řádově od desetin sekundy (pro stroje nízkých výkonů) až do několika vteřin (mohutné, výkonné stroje). Další nevýhodou je neustále se měnící rychlost otáčení rotoru při spouštění a v jeho důsledku kolísavá frekvence a magnituda signalizující patřičnou poruchu. Jedná se tedy o poměrně triviální metodu, která je vždy zatížena určitou chybou. Podmínkou pro aplikaci metody je délka rozběhu přesahující alespoň dvě sekundy a musí se vždy jednat o přímý rozběh, tedy motor spouštěný přímo ze sítě. Dále sledovaný motor nesmí být zatížen proměnným momentem. Metoda sledování rozběhu se pak jeví jako vhodná doplňková metoda, kdy se prostřednictvím přenosné měřící jednotky změří průběh rozběhu zaručeně zdravého stroje. S těmito naměřenými hodnotami se při každém dalším spouštění porovnává aktuální rozběh stroje a lze tak odhalit jakoukoliv anomálii, třeba i jen začínající. Projev poruchy je totiž závislý rovněž na počtu rotorových tyčí, v případě velkého množství tyčí se jedna lehce narušená tyč projeví podstatně méně než při nízkém počtu tyčí. Poruchy jsou pak signalizovány zjevnými zákmity objevujícími se při patřičných kritických frekvencích [25].

#### **2.4.4 Teorie podpisové analýzy statorového proudu (MCSA)**

Tato metoda k diagnostice poruch motoru využívá rozkladu statorových proudů do frekvenčního spektra. V ideálním, pouze teoretickém případě, by se ve frekvenčním spektru proudu zdravého motoru napájeného ideálním harmonickým napětím sítě projevila jen hlavní harmonická napájecího zdroje (50 Hz). Ve skutečnosti však napětí není zcela čistě sinusové a stejně tak neexistuje stroj bez výrobních nedokonalostí. Tyto a mnoho dalších původců, jako např. kolísání zátěže, okolní šum, fluktuace síťového napětí, chlazení strojů a poruchy v neposlední řadě, mají za následek vznik vyšších harmonických (celistvé násobky základní harmonické) a meziharmonických (necelistvé násobky základní harmonické), případně subharmonických. Zatímco různé důvody mohou dát vzniknout různým frekvencím v analyzovaném signálu, během dlouhodobého zkoumání došlo k odhalení projevů a vztahů spolehlivě odpovídajících patřičným poruchám. U motorů s poruchami tedy vznikají nadbytečná postranní pásma, která frekvenční spektrum deformují. Každá porucha má pak svůj, do jisté míry specifický projev. Je tedy možné od sebe jednotlivé vady rozlišit podle amplitudy pásma a frekvence, na které pásmo vzniklo. Vždy je ale nutno mít na paměti, že vyšší úrovně magnitud na hodnotě frekvence indikující poruchu mohou ve stroji vzniknout i z jiného důvodu, než kterým je skutečná porucha. Je proto důležité k této metodě přihlížet jako k užitečnému nástroji diagnostiky, ale v případě možné identifikace poruchy je

vhodné provést rekonstrukci, zpětně dohledat možné příčiny vzniku pásma, a následně stroj podrobit dalšímu testování. Základní myšlenkou této metody je tedy získání průběhu statorového proudu jedné nebo více fází v časové oblasti s co možná nejvyšším rozlišením. K takovému měření se obvykle využívají klešťové sondy a měřící proudové transformátory. Dalším krokem je převedení signálu z časové oblasti do oblasti frekvenční. Toho je obvykle dosaženo spektrálním analyzátozem, osciloskopem ovládajícím funkci rychlé Fourierovy transformace (fast Fourier transform – FFT), nebo vhodným softwarem. [24].

### Asymetrie rotoru

Je dokázáno, že rotorová asymetrie (porucha rotorových tyčí) má za následek vytvoření zpětně rotujícího magnetického pole o skluzové frekvenci vzhledem k hlavnímu dopřednému poli. Toto zpětné pole do statorového vinutí indukuje proud a v jeho důsledku také složku magnetomotorické síly (magnetomotive force – MMF) o frekvenci

$$f_{rotor} = f_1 \cdot (1 \pm 2 \cdot n \cdot s) \quad (10)$$

kde  $f_1$  je frekvence napájecího napětí;  $n$  je pořadí harmonické a  $s$  je poměrná hodnota skluzu.

Výraznější magnitudu má vždy zpětné pásmo odpovídající tvaru rovnice se záporným znaménkem, a tedy je z hlediska indikace poruchy rotorových tyčí významnější. Současně přitom platí, že čím rozsáhlejší je porucha rotorových tyčí, tím vyšší je magnituda na příslušné frekvenci indikující tuto poruchu ve frekvenčním spektru, případně je postiženo více pásem. Projev popsané poruchy je rovněž závislý na velikosti zátěže. Při žádné nebo jen minimální mechanické zátěži protékají statorovým vinutím proudy nízkých hodnot a postranní pásma způsobená poruchami klece jsou téměř nedetekovatelná. Hodnoty frekvence indikující poruchu rotorových tyčí jsou od celistvé harmonické posunuty jen o velice nízkou hodnotu odpovídající skluzu v poměrných jednotkách, je tedy zřejmé, že ke správné identifikaci poruch je důležité vysoké frekvenční rozlišení a velice přesně zjištěná hodnota skluzu [24].

### Poruchy statorového vinutí

Závitové zkratky statorového vinutí jsou předvojem poruchy jako je ztráta závitů a fáze. Zkratové proudy vytvářejí negativní magnetické toky působící proti celkovému toku fáze, čímž snižují magnetomotorické síly, kterými daná fáze působí na rotor stroje. Průběh výsledného magnetického toku ve vzduchové mezeře, který je ovlivněn zkreslením MMF, indukuje frekvence do spektra statorového proudu v okolí lichých harmonických podle vztahu

$$f_{stator} = f_1 \cdot \left[ \frac{k}{p} \cdot (1 - s) \pm n \right] \quad (11)$$

kde  $n$  je pořadí harmonické a nabývá hodnot 1, 3, 5, ...;  $s$  je skluz v poměrných hodnotách,  $p$  je počet pól-párů a  $k$  je celočíselný součinitel.

Pro zjištění poruch statorového vinutí existují jednodušší a spolehlivější metody a MCSA se za tímto účelem většinou nepoužívá [20] [24].

### Poruchy ložisek

Poruchy ložisek se nejčastěji objevují v důsledku ložiskových proudů nebo vady na hřídeli. Tyto anomálie pak mohou vznikat nevhodnou instalací nebo následně v provozu stroje a vlastním silovým působením způsobit defekt kuliček či válečků, ložiskové klece nebo vnitřního a vnějšího kroužku. Vadná ložiska pak zapříčiňují proměnlivou délku vzduchové mezery při otáčení rotoru, což se projeví vznikem nezvyklých frekvencí ve frekvenčním spektru statorových proudů podle vztahu

$$f_{lp} = f_1 \pm p_l \cdot f_l \quad (12)$$

kde  $p_l$  je počet valivých elementů a  $f_l$  zachycuje jednotlivé poruchy vyznačující se vznikem konkrétních pásem podle vztahů (15) až (18). Platí:

Frekvence vzniklá jako důsledek poruchy na vnitřním kroužku

$$f_{l-vnitř} = \frac{p_l}{2} \cdot (1 - s) \cdot f_1 \cdot \left[ 1 + \frac{d_k}{d_r} \cdot \cos(\beta) \right] \quad (13)$$

Frekvence vzniklá jako důsledek poruchy na vnějším kroužku

$$f_{l-vně} = \frac{p_l}{2} \cdot (1 - s) \cdot f_1 \cdot \left[ 1 - \frac{d_k}{d_r} \cdot \cos(\beta) \right] \quad (14)$$

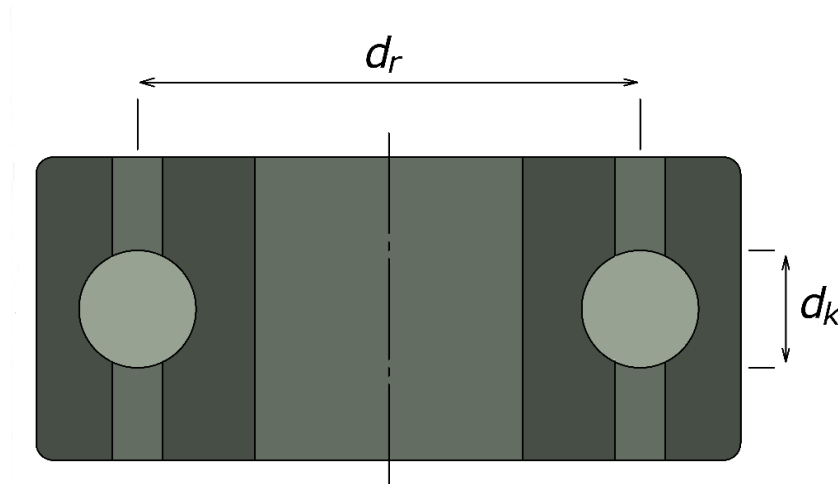
Frekvence vzniklá jako důsledek vadného valivého elementu

$$f_{l-element} = \frac{d_r}{2 \cdot d_k} \cdot (1 - s) \cdot f_1 \cdot \left\{ 1 - \left[ \frac{d_k}{d_r} \cdot \cos(\beta) \right]^2 \right\} \quad (15)$$

Frekvence vzniklá jako důsledek vadné klece

$$f_{l-klec} = \frac{1}{2} \cdot (1 - s) \cdot f_1 \cdot \left[ 1 + \frac{d_k}{d_r} \cdot \cos(\beta) \right] \quad (16)$$

kde  $p_l$  je počet valivých elementů;  $s$  je skluz v poměrných hodnotách;  $f_1$  je napájecí frekvence;  $d_k$  je průměr elementu;  $d_r$  je roztečný průměr a  $\beta$  je úhel naklonění osy rotace elementu [24].



**Obrázek 6. Náskres kuličkového ložiska**

### **Excentricita vzduchové mezery**

Excentricity existují buď ve statické nebo dynamické formě. Nerovnoměrnost vzduchové mezery se ve frekvenčním spektru projeví vznikem postranních pásem na příslušných hodnotách frekvence.

Pro výpočet frekvencí odpovídajících excentricitě byl již nastíněn obecný vztah (7). V praxi se však využívá dvou vztahů pro výpočet pásem na nižších kmitočtech

$$f_{exc\_niž} = \left[ 1 \pm n \cdot \frac{(1-s)}{p} \right] \cdot f_1 \quad (17)$$

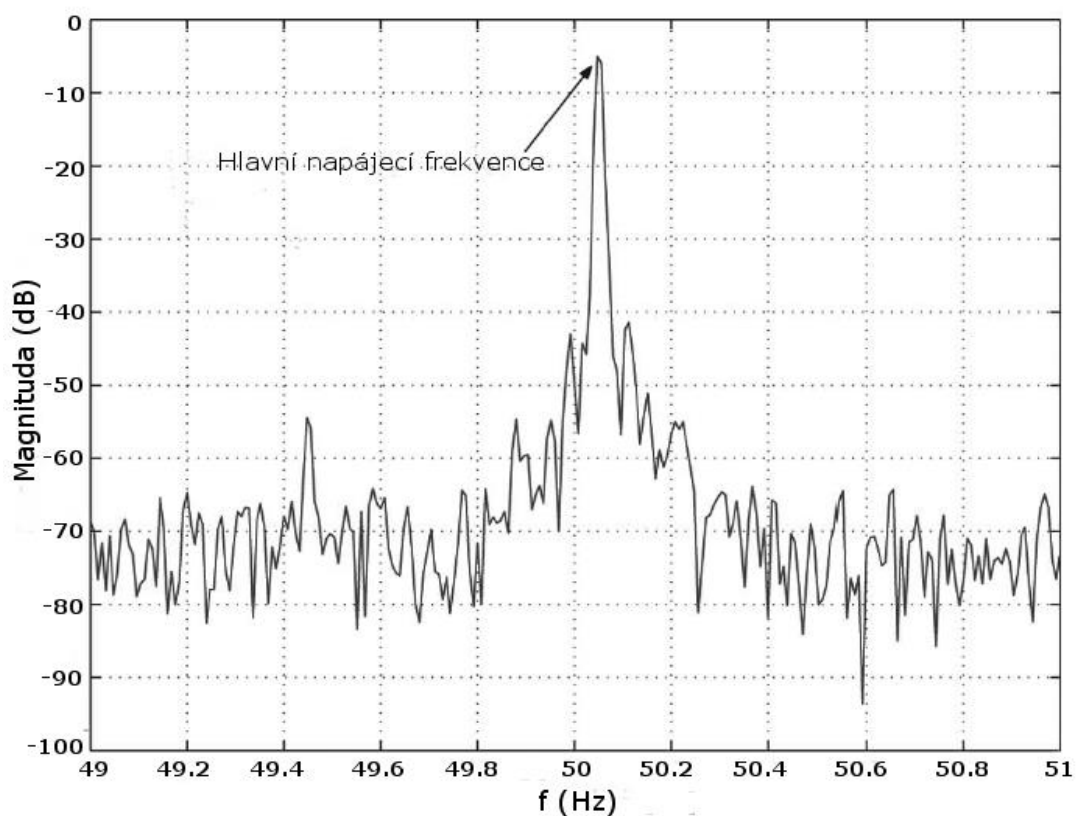
a na frekvencích vyšších hodnot

$$f_{exc\_vyš} = \left[ \frac{Q}{p} \cdot (1-s) \pm n \right] \cdot f_1 \quad (18)$$

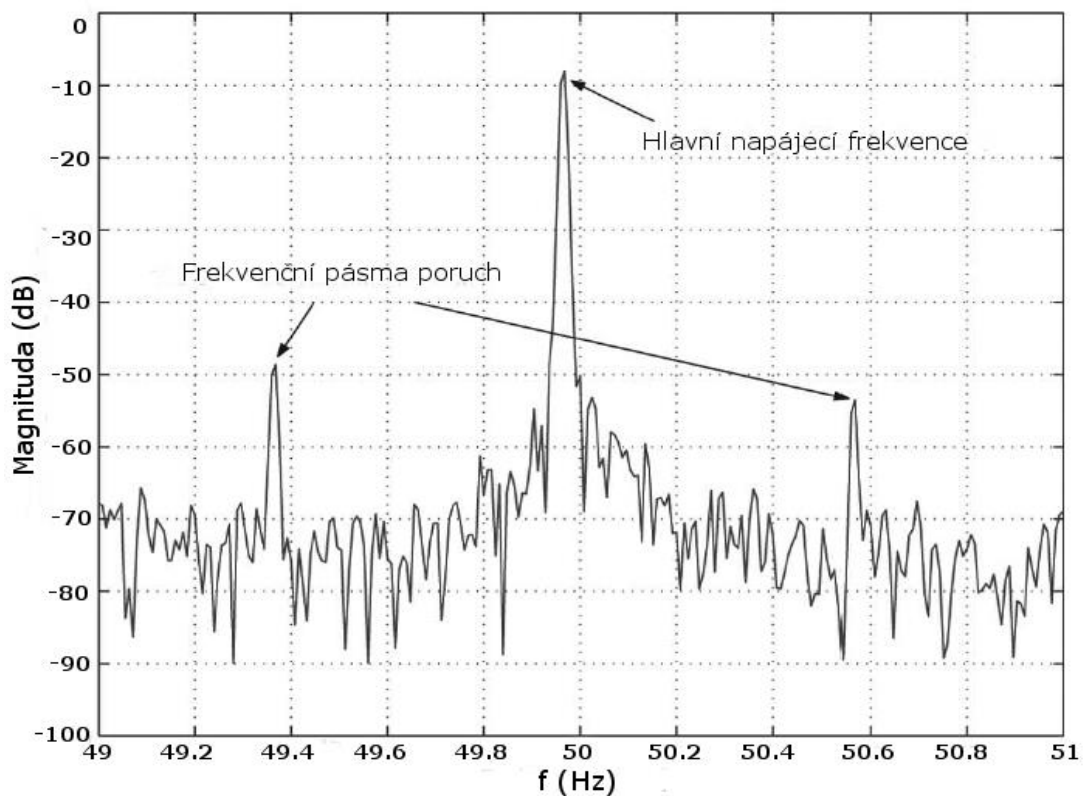
Dále může dojít ještě ke vzniku postranních komponent posunutých o rotorovou frekvenci od složek vypočtených podle vztahu (18)

$$f_{exc\_vyš} \pm f_r = \left\{ \left[ \frac{Q}{p} \cdot (1-s) \pm n \right] \pm \left[ \frac{(1-s)}{p} \right] \right\} \cdot f_1 \quad (19)$$

kde  $Q$  je počet drážek rotoru;  $p$  je počet pól-párů;  $n$  je pořadí harmonické,  $n=1, 3, 5, \dots$ ;  $s$  je skluz v poměrných hodnotách a  $f_1$  je frekvence napájení.



**Obrázek 7. Příklad frekvenčního spektra zdravého stroje [24]**



**Obrázek 8. Příklad frekvenčního spektra při poruše rotorových tyčí [24]**

## 2.4.5 Fourierova transformace

Fourierova transformace je typ integrální transformace převádějící spojitý signál mezi časovou a frekvenční oblastí. Každá spojitá periodická funkce může být prostřednictvím Fourierovy transformace rozložena na stejnosměrnou složku, základní harmonickou a nekonečnou řadu harmonických složek vyšších řádů, popsaných funkcemi sinus a cosinus. Každá složka má pak určitou amplitudu a fázi. Výsledná řada, známá jako Fourierova řada, tedy popisuje vzájemný vztah zkoumané funkce v časové a frekvenční oblasti. Aplikací Fourierovy transformace na spojitý signál s periodou opakování  $T$  v časové oblasti získáme řadu diskrétních frekvenčních složek ve frekvenční oblasti. K získání těchto složek ze zkoumaného signálu obecně slouží následující vztahy [26]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{T}\right) \right] \quad (20)$$

přičemž platí

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cdot dt \quad (21)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{T}\right) \cdot dt \quad (22)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{T}\right) \cdot dt \quad (23)$$

kde  $a_0$ ,  $a_n$  a  $b_n$  jsou Fourierovy koeficienty,  $n$  je řád harmonické a  $T$  je perioda opakování signálu.

V dnešní době jsou však výrazně častěji užívány signály číslicové před signály analogovými. Znamená to, že jsou informace o signálu ukládány v určitých diskrétních okamžicích pomocí okamžitých hodnot, a ne prostřednictvím matematických funkcí. Z popsaného vyplývá, že na takový časový záznam nelze klasickou Fourierovu transformaci použít a je třeba signál analyzovat jiným způsobem.

### 2.4.5.1 Diskrétní Fourierova transformace

Za účelem analýzy vzorkovaných periodických číslicových signálů vznikla tzv. diskrétní Fourierova transformace (DFT).

V případě periodicky se opakující řady čísel o  $N$  prvcích  $f_0, f_1, \dots, f_{N-1}$  je její Fourierova transformace definována následujícím vztahem [27]

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k \cdot e^{-j \frac{2 \cdot \pi}{N} k \cdot n} \quad (24)$$

kde  $n=0, 1, \dots, N-1$

Je vhodné si uvědomit, že je-li původní řada dat  $f_k$  reálná, výsledná řada  $F_n$  bude obecně komplexní. Značnou nevýhodou výpočtu diskretní Fourierovy transformace je její časová náročnost, která roste s druhou mocninou délky vstupní posloupnosti. Pro účel převedení signálu z časové oblasti do oblasti frekvenční je proto v praxi nepoužívanějším algoritmem tzv. rychlá Fourierova transformace (fast Fourier transform – FFT).

#### 2.4.5.2 Rychlá Fourierova transformace

Zatímco klasická diskretní Fourierova transformace počítá  $N^2$  prvků (např. Vandermondova matice, viz [27]), rychlá Fourierova transformace je výsledkem snahy o snížení množství operací a o urychlení výpočetního procesu. Podle Cooley-Tukey algoritmu [27] je totiž možno vypočítat diskretní Fourierovu transformaci s totožným výsledkem jako pomocí klasické DFT o složitosti pouze  $N \cdot \log_2(N)$  operací, což délku výpočtu, zejména při velkém množství vzorků, značně snižuje. Rychlá Fourierova transformace má však svá specifika. V klasické podobě ji lze vypočítat pro signály, u kterých je vstupem  $2^n$  vzorků, tedy počet vzorků  $N$  musí být mocninou čísla dvě. Takto tomu je především u FFT implementované do různých softwarů nebo osciloskopů. V dnešní době však již existují i složitější algoritmy, díky kterým je možno vypočítat FFT pro libovolný počet vzorků.

Postup výpočtu vychází principiálně ze vztahu (20), avšak obecně stačí při DFT reálného vstupního signálu se sudým počtem vzorků spočítat pouze prvních  $N/2$  prvků dvojstranného spektra, protože zbylých  $N/2$  hodnot je komplexně sdružených kolem středu spektra. Pro výpočet FFT podle Cooley-Tukey algoritmu se vzorky signálu následně rozdělí na dvě skupiny a sice na vzorky sudé a liché.

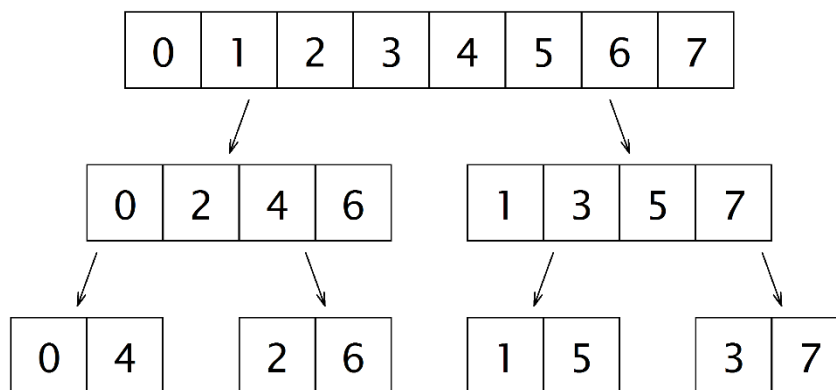
$$e_n = f_{2n} \quad (25)$$

$$o_n = f_{2n+1} \quad (26)$$

kde  $n=0, 1, \dots, N/2-1$ , přičemž se vztah (20) upraví do následujícího tvaru

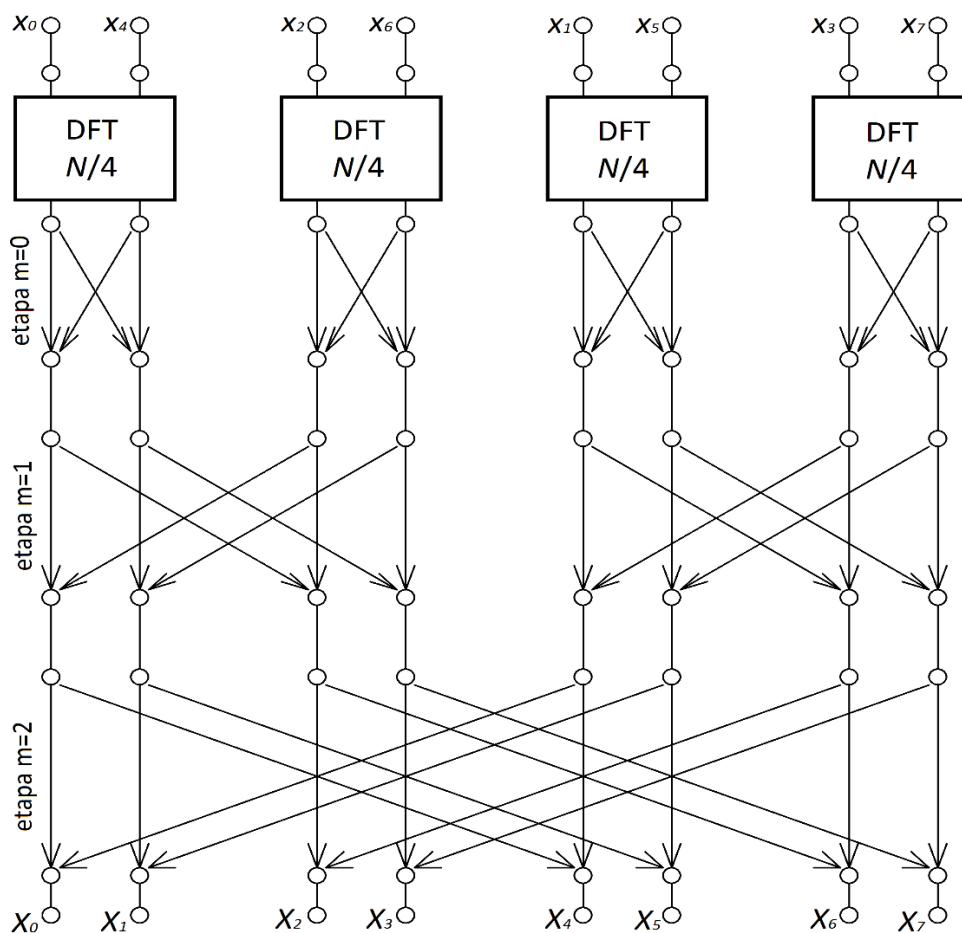
$$F_n = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} \left( e_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k) \cdot n} + o_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k+1) \cdot n} \right) \quad (27)$$

Transformace o  $N$  prvcích se tak rozdělí na dvě transformace o  $N/2$  prvcích, čímž se počet komplexních součinů sníží na polovinu, ale přitom se neztratí žádná informace. Pokud má vstupní posloupnost délku  $N=2^n$ , lze transformace dělit dále až na  $N/2$  jednoduchých transformací o velikosti 2 (1. řád). Postup dělení transformací je zřejmý z obrázku 9.



**Obrázek 9. Příklad dělení transformací pro počet vzorků  $N=8$**

Každý proces výpočtu FFT má vždy  $m=\log_2(N)$  etap, přičemž v každé etapě je vypočteno  $N$  součinů. Dohromady je během jedné transformace vypočteno  $N \cdot m$  součinů a celkový počet operací je tedy  $N \cdot \log_2(N)$ . Cooley-Tukey algoritmus výpočtu FFT je ilustrován na Obrázku 10.



**Obrázek 10. Postup výpočtu diskrétní Fourierovy transformace pro  $N=8$  prostřednictvím Cooley-Tukey algoritmu**



Při převodu časového signálu do frekvenční oblasti je nutné vzít v úvahu tzv. aliasing efekt. Aliasingem rozumíme falšování informace uložené v původním signálu v důsledku nedodržení podmínky tzv. Shannonova teorému. Tedy, aby bylo možno bezpečně zjistit, které frekvence jsou v analyzovaném signálu přítomny, je nutné, aby vzorkovací frekvence byla alespoň dvojnásobná oproti nejvyšší frekvenci zastoupené ve vzorkovaném signálu. Pouze tehdy je možné zpětnou rekonstrukcí frekvenčního spektra získat zpět původní signál. Pokud je totiž vzorkovací frekvence nižší než některé z frekvencí obsažených ve zkoumaném signálu, dojde ke špatné interpretaci těchto vysokofrekvenčních složek. Ty se následně ve frekvenčním spektru projeví na nižších hodnotách frekvence, respektive je nebude možné od skutečných nízkofrekvenčních složek rozpoznat. Z této úvahy vyplývá tzv. Nyquistova frekvence, která udává nejvyšší možnou frekvenci ve spektru, kterou lze při dané vzorkovací frekvenci spolehlivě interpretovat.

$$f_{Nyq} = \frac{f_s}{2} = \frac{N}{2 \cdot t} \quad (28)$$

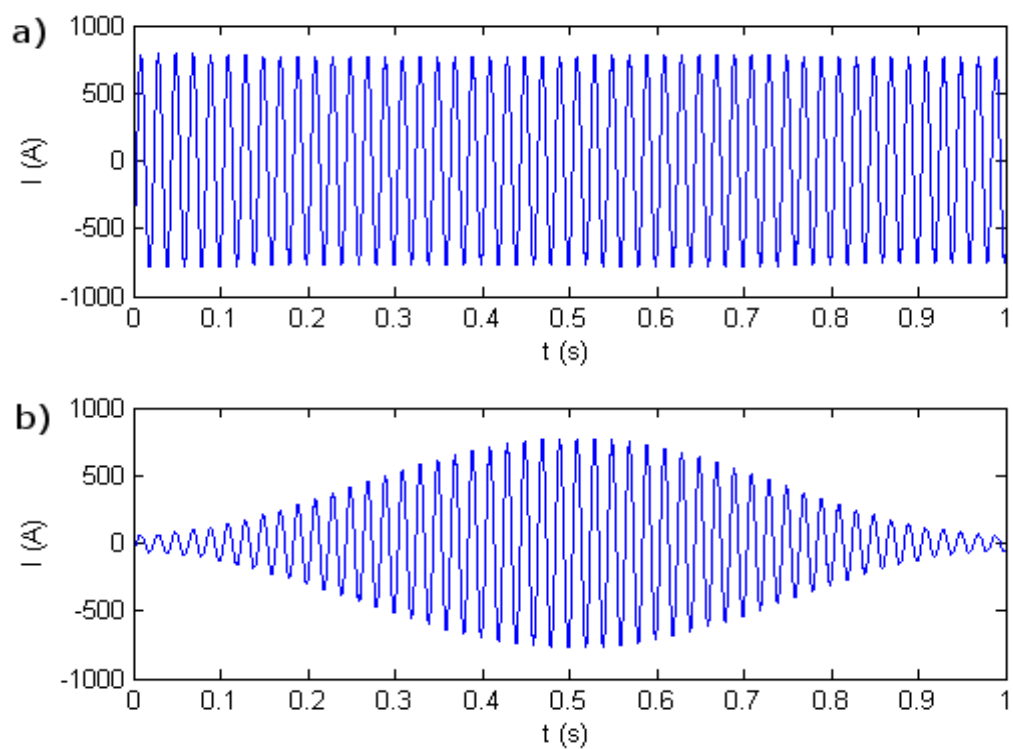
kde  $f_s$  je vzorkovací frekvence,  $N$  je počet vzorků navzorkovaného signálu a  $t$  je délka signálu

Základním předpokladem pro správné vyhodnocení je provést měření v dostatečném frekvenčním rozlišení. Obecně platí, že čím delší je záznam signálu, tím vyšší je frekvenční rozlišení, ale rovněž roste množství ukládaných dat. Pro frekvenční rozlišení platí

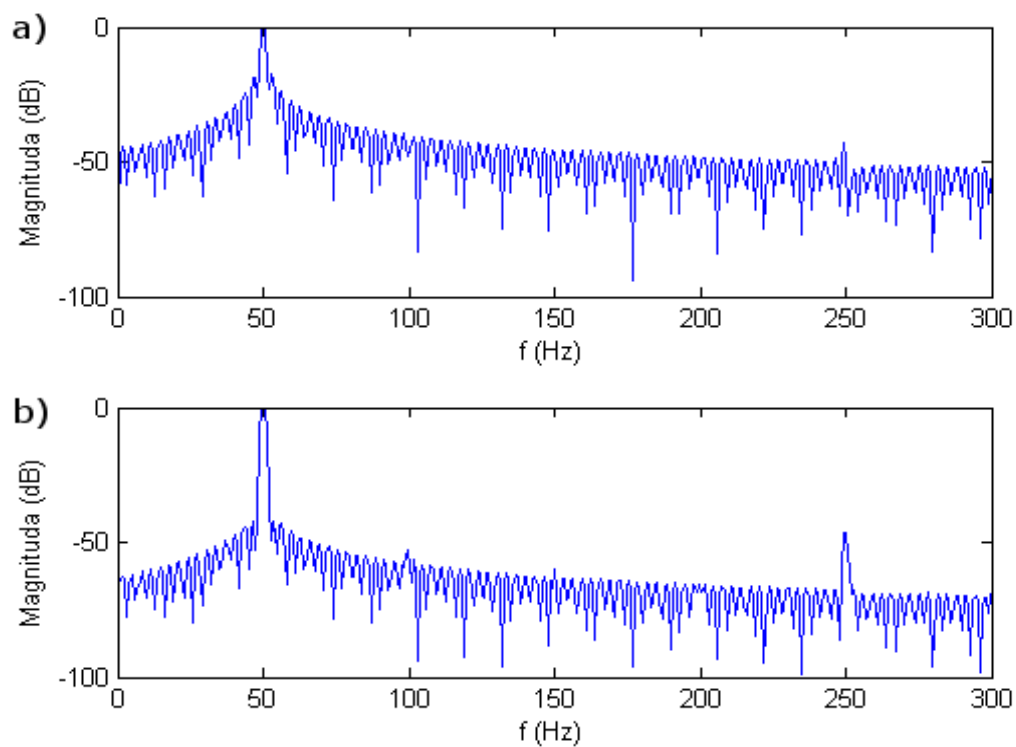
$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{t} \quad (29)$$

Dále o tomto jevu pojednává Nyquistův-Shannonův teorém [28].

V případě, že změřený signál není zcela periodický, což je v praxi velice časté, dojde při transformaci do frekvenční oblasti k tzv. úniku energie (spectral leakage) do mnoha spektrálních čar blízkých skutečné frekvenci. Tím se zvýší amplituda příslušných čar a skutečný transformovaný signál je ve spektru částečně pohlcen. Tento jev je možno značně negovat použitím váhových oken, tzv. okénkováním. Okénkování spočívá v násobení signálu v časové oblasti oknem s konečnou délkou a amplitudou hladce klesající od středu k hranám. Na každý signál bez využití okénkování je v principu nahlíženo jako by byl násoben tzv. obdelníkovým oknem o váze 1. To znamená, že nedochází ke změně amplitudy vzorků. Okénkových funkcí je velké množství a je tedy vhodné rozumět charakteristikám jednotlivých oken a vhodnosti jejich aplikace na daný signál.



**Obrázek 11. Signál v časové oblasti a) obdelníkové okno b) Hammingovo okno**



**Obrázek 12. Frekvenční spektrum signálu a) obdelníkové okno – spektrální únik b) Hammingovo okno – potlačení spektrálního úniku**

### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

V této části práce bude provedena diagnostika několika asynchronních motorů vysokého výkonu využívaných pro pohon čerpadel na jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín.

Stroje budou analyzovány pomocí následujících diagnostických metod

1. Měření odporu, indukčnosti a kapacity vinutí
2. Vysokonapěťová zkouška konstantním napětím
3. Zkouška rázovou vlnou
4. Podpisovaná analýza statorových proudů (MCSA)

#### 3.1 Měření statických vlastností vinutí stroje

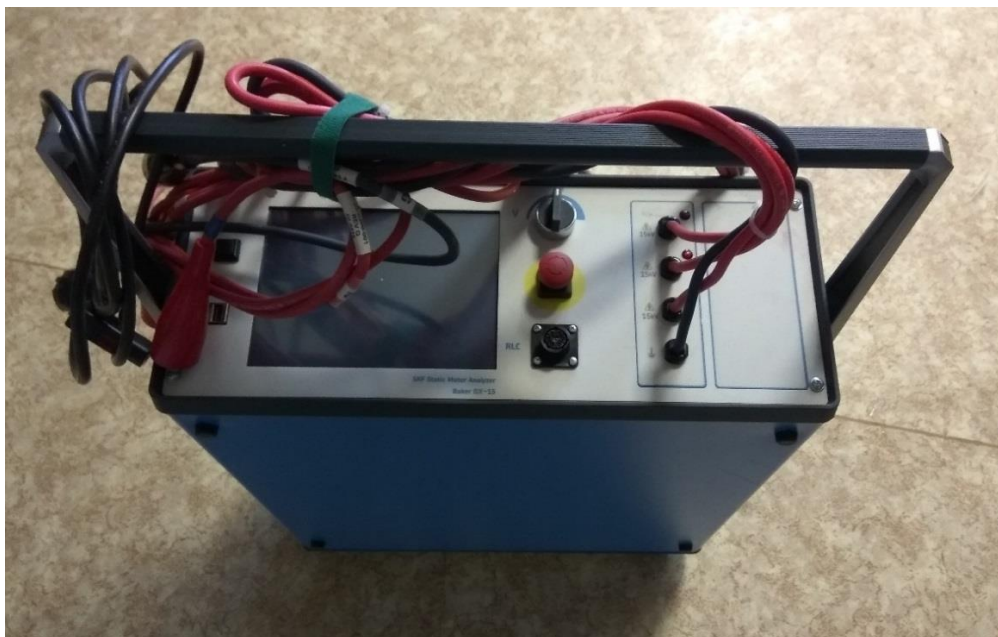
Tato část je věnována měření statických vlastností vinutí a zabývá se tak zkouškami na elektromotorech při údržbě (off-line testování) s účelem zjistit a zkontrolovat aktuální stav izolace vinutí. K aplikaci metod zmíněných v předchozí kapitole byly vybrány tři asynchronní stroje stejného typu z čerpací stanice Jihlava, přidružené k elektrárně Dukovany. Motory pracují v zapojení do hvězdy a jsou využity pro pohon čerpadel chladicí vody do vodojemu, odkud je chladivo následně čerpáno do chladících věží.

**Tabulka 1. Štítkové hodnoty použitých motorů**

Jmenovitý výkon	$P_n$	(MW)	1
Jmenovitý proud	$I_n$	(A)	120
Jmenovité napětí	U	(kV)	6
Frekvence	f	(Hz)	50
Účinník	$\cos\varphi$	(-)	0,86
Účinnost	$\eta$	(%)	93
Nominální otáčky	$n_n$	( $\text{min}^{-1}$ )	990
Jmenovitý skluz	$s_n$	(%)	1
Počet pólových dvojic	p	(-)	3

Izolační stav je parametr dlouhodobě ovlivňující schopnost motoru správně pracovat. Při zhoršení stavu či dokonce poškození izolace vinutí dochází ke zhoršení izolačních vlastností a může dojít např. k poruše proudu nakrátko vlivem vzniklé proudovodné dráhy.

Všechny zkoušky vlastností vinutí byly provedeny prostřednictvím měřicí jednotky SKF Static Motor Analyzer, Baker DX-15, [29]. Tento měřicí systém nabízí poměrně rozsáhlé množství statických zkoušek s funkcí automatického generování grafického znázornění výsledků a hodí se tak k analýze statorových poruch.



**Obrázek 13. Měřicí stanice SKF, Baker DX-15**

### **3.1.1 Měření odporu, indukčnosti a kapacity vinutí**

Nejjednodušším měřením za účelem zjištění izolačního stavu vinutí je měření pasivních obvodových prvků, tedy ohmického odporu, indukčnosti a kapacity.

Zjištění odporu se provádí přiložením stejnosměrného napětí vhodné velikosti na jednotlivé cívkky. Poté se odpor jednoduše vypočte jako poměr přiloženého napětí a proudu procházejícího cívkou.

V případě měření pomocí analyzátoru SKF dochází k měření odporu vždy dvou fází v sérii a k následnému porovnání takto získaných hodnot odporů. Jednoduše je pak možno matematicky dopočítat odpor jednotlivých fází.

Obdobným způsobem, avšak pomocí střídavého napětí s definovanou frekvencí, byla změřena impedance vinutí vždy dvou fází v sériovém zapojení. Z hodnoty impedance přístroj následně vypočetl reaktance a výsledné hodnoty indukčnosti. Vzhledem ke skutečnosti, že měřicí přístroj je původem americký, je pro měření indukčnosti z výroby nastavena frekvence zkušebního napětí 60 Hz. Měření se provádí za účelem odhalení mezizávitových zkratů vinutí jednotlivých fází. U stroje, který má izolaci v dobrém stavu, by se hodnoty obvodových veličin změřené v jednotlivých fázích měly navzájem přibližně rovnat.

Pro měření kapacity vinutí-kostra měřicí přístroj spojil všechny tři fáze do série a změřil tak celkovou kapacitu vinutí proti kostře stroje. Hodnota frekvence zkušebního napětí 4 kHz je nastavena a použita s ohledem na velikost capacitance. Kapacity mezi jednotlivými částmi stroje mají svou důležitost v souvislosti s možným použitím frekvenčních měničů, kdy vlivem spínání polovodičových součástek vznikají výrazné strmosti nárůstu a poklesu napětí  $du/dt$ . Přitom obecně

platí, že v důsledku časové změny napětí kapacitou protéká proud, respektive proudové pulzy

$$i_c(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (30)$$

Tento jev je důležitý zejména při analýze poruch ložisek v důsledku ložiskových proudů apod. U analyzovaných motorů se však pro řízení a regulaci polovodičové měniče nepoužívají a tato práce se rovněž hlouběji nezabývá analýzou ložisek, proto zde měření kapacity nemá výraznější opodstatnění.

**Tabulka 2. Změřené hodnoty R, L a C - motor1**

Motor 1						
<b>Odpor</b>		L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	L <sub>3</sub> -L <sub>1</sub>	Odchylka (%)	Průměr
Stejnoseměrný odpor	R (mΩ)	517,14	517,40	517,50	0,00	517,35
<b>Indukčnost</b>		L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	L <sub>3</sub> -L <sub>1</sub>	Odchylka (%)	Průměr
Frekvence	f (Hz)	60	60	60		
Reaktance	X <sub>L</sub> (mΩ)	11,911	11,906	11,920		
Indukčnost	L (mH)	31,157	31,150	31,181	0,1	31,163
<b>Kapacita</b>		L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub> +L <sub>3</sub>				
Frekvence	f (Hz)	4000				
Kapacita	C (nF)	67,6				

**Tabulka 3. Změřené hodnoty R, L a C - motor 2**

Motor 2						
<b>Odpor</b>		L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	L <sub>3</sub> -L <sub>1</sub>	Odchylka (%)	Průměr
Stejnoseměrný odpor	R (mΩ)	535,91	535,86	536,00	0,00	535,93
<b>Indukčnost</b>		L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	L <sub>3</sub> -L <sub>1</sub>	Odchylka (%)	Průměr
Frekvence	f (Hz)	60	60	60		
Reaktance	X <sub>L</sub> (mΩ)	12,199	12,196	12,201		
Indukčnost	L (mH)	31,930	31,923	31,934	0	31,929
<b>Kapacita</b>		L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub> +L <sub>3</sub>				
Frekvence	f (Hz)	4000				
Kapacita	C (nF)	68,9				

**Tabulka 4. Změřené hodnoty R, L a C - motor 3**

Motor 3						
Odpor		L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	L <sub>3</sub> -L <sub>1</sub>	Odchylka (%)	Průměr
Stejnoseměrný odpor	R (mΩ)	543,09	543,35	543,24	0	543,23
Indukčnost		L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	L <sub>3</sub> -L <sub>1</sub>	Odchylka (%)	Průměr
Frekvence	f (Hz)	60	60	60		
Reaktance	X <sub>L</sub> (mΩ)	12,056	12,072	12,037	0,1	12,055
Indukčnost	L (mH)	31,540	31,585	31,489	0,2	31,538
Kapacita		L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub> +L <sub>3</sub>				
Frekvence	f (Hz)	4000				
Kapacita	C (nF)	76,0				

**3.1.1.1 Vyhodnocení**

Měření obvodových prvků se využívá jako prvotní ukazatel stavu izolace. V případě výskytu mezizávitových zkratů dochází ke snížení ohmického odporu a indukčnosti vinutí poruchové fáze. Vzhledem ke změřeným výsledkům, které jsou pro jednotlivé fáze téměř totožné, nelze usuzovat na existenci závitových zkratů. Parazitní kapacita mezi vinutím a kostrou stroje je dostatečně malá a u všech strojů dosahuje obdobné hodnoty.

**3.1.2 Vysokonapěťová zkouška konstantním napětím**

Vzhledem ke skutečnosti, že izolační vlastnosti se vlivem procesu stárnutí mění v čase, nelze pouhou kontrolu obvodových veličin vinutí považovat za dostatečný ukazatel stavu izolace z hlediska poruch. Proto na zkoumaných strojích byla provedena i vysokonapěťová zkouška konstantním stejnosměrným napětím.

Tato zkouška byla provedena při teplotě  $T_I=15\text{ °C}$  a relativní vlhkosti  $\varphi=45\text{ %}$ .

**Tabulka 5. Změřené hodnoty při vysokonapěťové zkoušce**

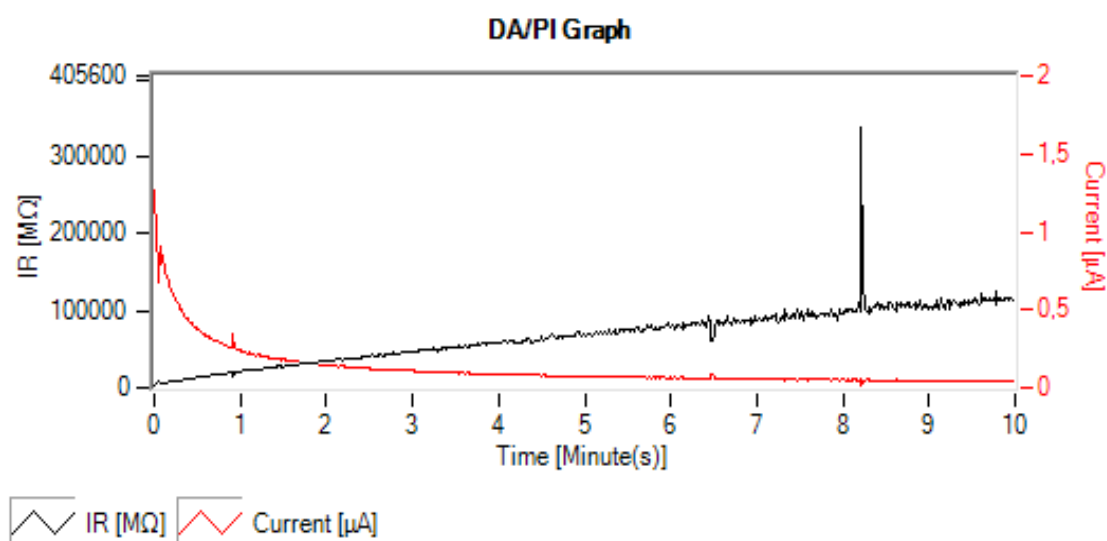
	Motor 1			Motor 2			Motor 3		
t	U	I	R <sub>I</sub>	U	I	R <sub>I</sub>	U	I	R <sub>I</sub>
(min)	(V)	(μA)	(MΩ)	(V)	(μA)	(MΩ)	(V)	(μA)	(MΩ)
0:15	5070	0,591	8578,68	5020	0,681	7371,51	5010	0,634	7902,21
0:30		0,384	13203,12		0,504	9960,32		0,462	10844,2
0:45		0,297	17070,71		0,419	11980,91		0,370	13540,5
1:00		0,244	20778,69		0,363	13829,20		0,312	16089,7
1:30		0,178	28483,15		0,297	16902,36		0,248	20241,9
2:00		0,144	35208,33		0,262	19160,31		0,206	24368,9
2:30		0,123	41219,51		0,234	21452,99		0,181	27734,8
3:00		0,110	46090,91		0,215	23348,84		0,162	30987,7
4:00		0,086	58953,49		0,189	26560,85		0,131	38320,6

	Motor 1			Motor 2			Motor 3		
t	U	I	R <sub>I</sub>	U	I	R <sub>I</sub>	U	I	R <sub>I</sub>
(min)	(V)	( $\mu$ A)	(M $\Omega$ )	(V)	( $\mu$ A)	(M $\Omega$ )	(V)	( $\mu$ A)	(M $\Omega$ )
5:00	5070	0,073	69452,06	5020	0,166	30240,97	5010	0,120	41833,33
6:00		0,065	78000,00		0,157	31974,52		0,106	47358,49
7:00		0,054	93888,89		0,145	34620,69		0,098	51224,49
8:00		0,052	97500,00		0,139	36115,11		0,088	57045,45
9:00		0,049	103469,39		0,133	37744,36		0,078	64358,97
10:00		0,042	120714,29		0,126	39841,27		0,075	66933,33

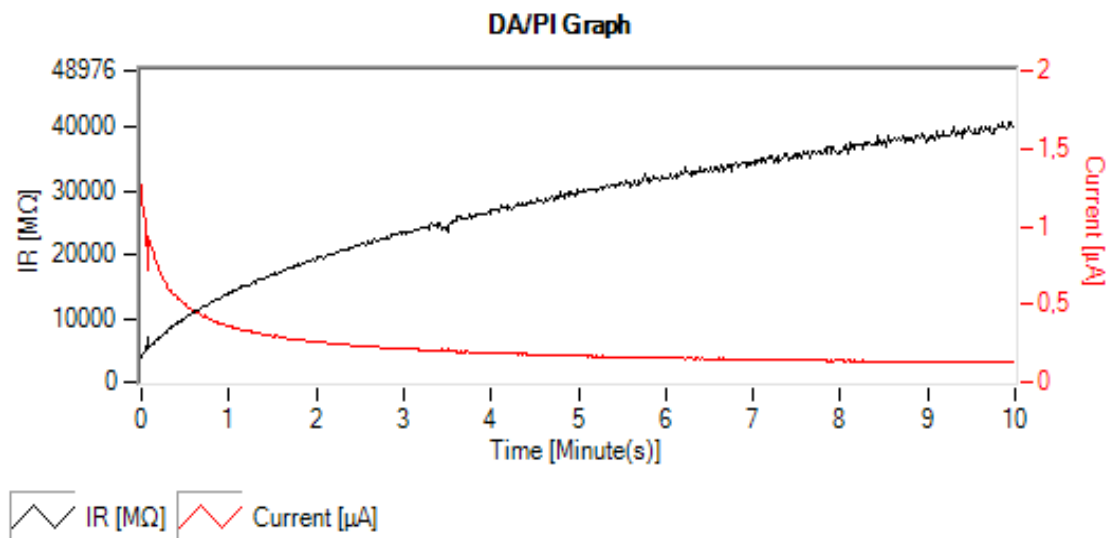
Podle vztahů (3) a (4) byl ze zvýrazněných hodnot Tabulky 5 vypočten polarizační index a dielektrická absorpce pro posouzení stavu izolace jednotlivých strojů.

**Tabulka 6. Výpočet polarizačního indexu a dielektrické absorpce**

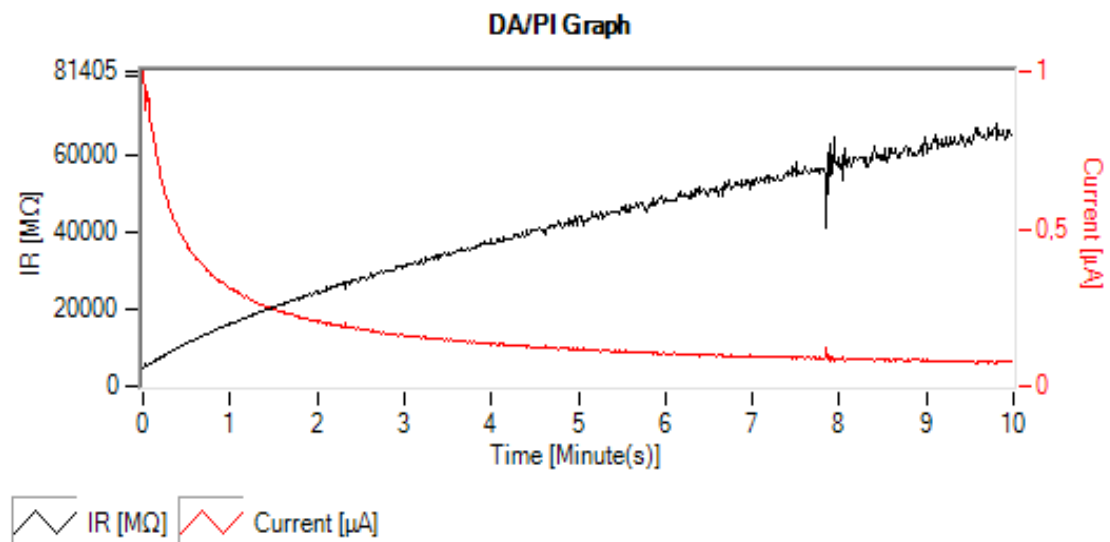
	Motor 1	Motor 2	Motor 3
PI	5,81	2,88	4,16
DAR	1,57	1,39	1,48



**Obrázek 14. Průběh nárůstu izolačního odporu v čase - motor 1**



**Obrázek 15. Průběh nárůstu izolačního odporu v čase - motor 2**



**Obrázek 16. Průběh nárůstu izolačního odporu v čase - motor 3**

### 3.1.2.1 Vyhodnocení

U všech analyzovaných strojů je vinutí původní, tedy již přibližně 35 let staré. Jako izolační materiál byla u všech motorů použita pryskyřice.

Z naměřených výsledků vysokonapěťové zkoušky lze vyvodit hned několik závěrů. Vzhledem k tomu, že izolační odpor v čase roste u všech strojů do řádů desítek GΩ, je izolační vlastnost vinutí u všech analyzovaných motorů dostatečná. Mezi stavy jednotlivých strojů je však možno pozorovat výrazné rozdíly. Značně se liší zejména maximální dosažené hodnoty izolačního odporu na konci zkoušky. Z této skutečnosti rovněž vyplývají rozdílné velikosti hodnot polarizačního indexu a dielektrické absorpce. U všech strojů byl zaznamenán polarizační index přesahující



mezni hodnotu  $PI=2$ , nicméně izolace motoru 2 je této hodnotě již poměrně blízko a bylo by vhodné tento stroj zahrnout do plánu oprav a nechat jej převinout. Motory 1 a 3 vykazují dostatečnou izolační vlastnost ve všech kritériích vysokonapěťové zkoušky a v tomto ohledu tedy zatím není nutné investovat do převýjení těchto strojů.

### 3.1.3 Zkouška rázovou vlnou

Měření izolačního odporu, polarizačního indexu a dielektrické absorpce lze využít pro určení maximální izolační schopnosti vinutí, nicméně nepodává přesvědčivé informace o možných mezizávitových zkratech. Pro zkoumání izolace z hlediska mezizávitových zkratů se obvykle využívá test rázovou vlnou. Při této zkoušce je do cívek injektován určitý počet krátkých, vysokých a strmých proudových impulzů z impulzního generátoru, který je zabudován v měřící jednotce SKF Static Motor Analyzer. Z důvodu vzniku rezonančního obvodu kondenzátor-vinutí se na jednotlivých fázích projeví tlumené kmitání, jehož časový průběh je ovlivněn obvodovými prvky, ale také počtem závitů cívky. Proudový impulz v důsledku Lenzova zákona indukuje napětí do přiléhajících závitů. Pokud je izolace mezi dvěma závitů poškozená nebo z nějakého důvodu oslabena, a pokud je rozdíl napětí mezi závitů vlivem odeznívání impulzu dostatečně velký, může dojít k výboji, který přístroj zaznamená. V ideálním případě by měl být průběh ve všech fázích totožný, prakticky se však průběhy vždy mírně liší. Jakákoliv změna stavu vinutí jednotlivých fází se projeví v porovnání průběhů a lze tak snadno odhalit zhoršený stav izolace. Maximální přípustná odchylka špiček jednotlivých průběhů je limitně stanovena na 10 % a při jejím překročení se jedná o nevyhovující stav.

**Tabulka 7. Rázová zkouška – motor 1**

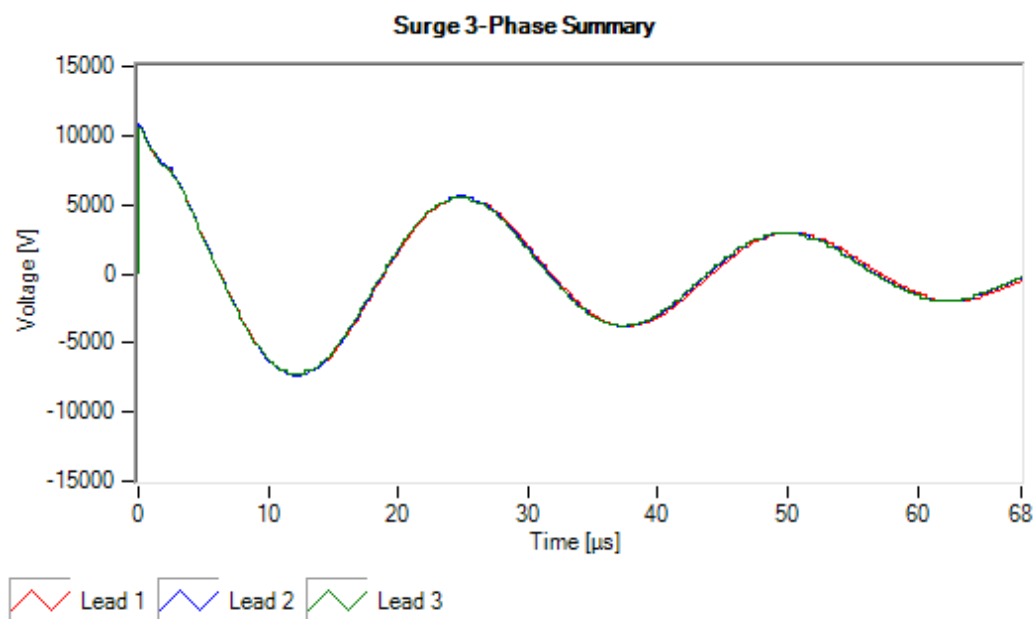
Motor 1			
Fáze (-)	$U_{\max}$ (V)	Počet pulzů (-)	Odchylka (%)
1-2	10470	52	3
2-3	10620	56	2
3-1	10320	54	5

**Tabulka 8. Rázová zkouška – motor 2**

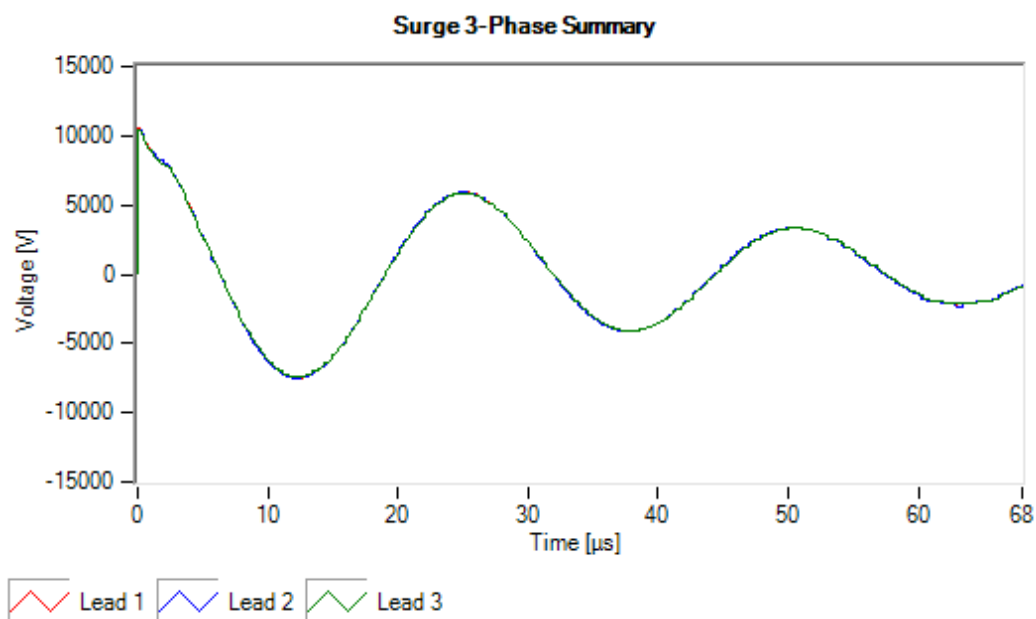
Motor 2			
Fáze (-)	$U_{\max}$ (V)	Počet pulzů (-)	Odchylka (%)
1-2	10320	53	0
2-3	10170	63	2
3-1	10170	52	2

**Tabulka 9. Rázová zkouška – motor 3**

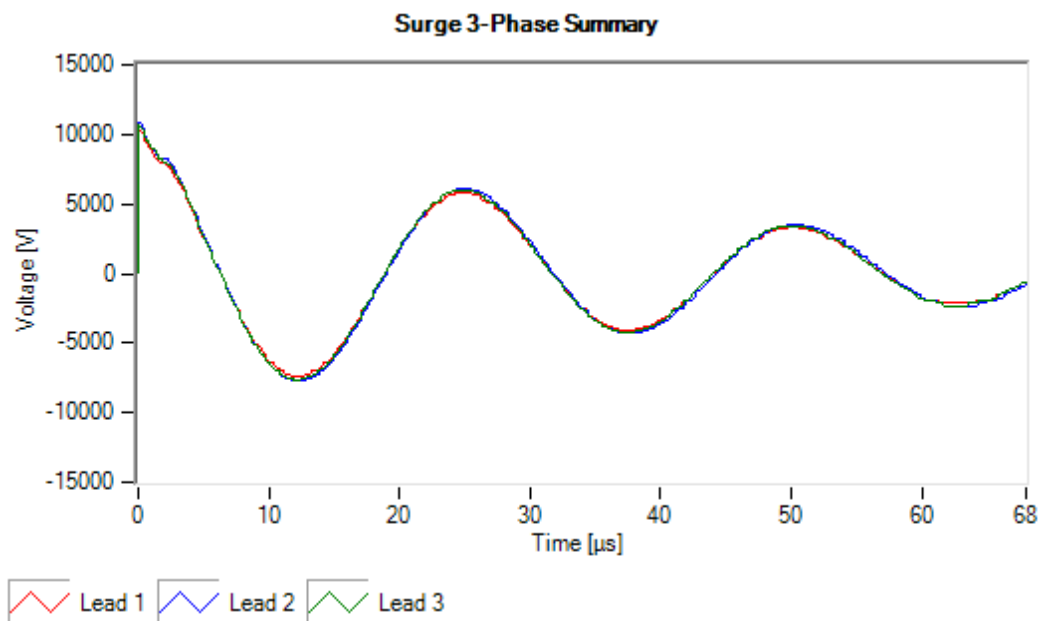
Motor 3			
Fáze (-)	$U_{\max}$ (V)	Počet pulzů (-)	Odchylka (%)
1-2	10170	52	6
2-3	10620	54	4
3-1	10470	53	3



**Obrázek 17. Porovnání průběhů rázové zkoušky - motor 1**



**Obrázek 18. Porovnání průběhů rázové zkoušky – motor 2**



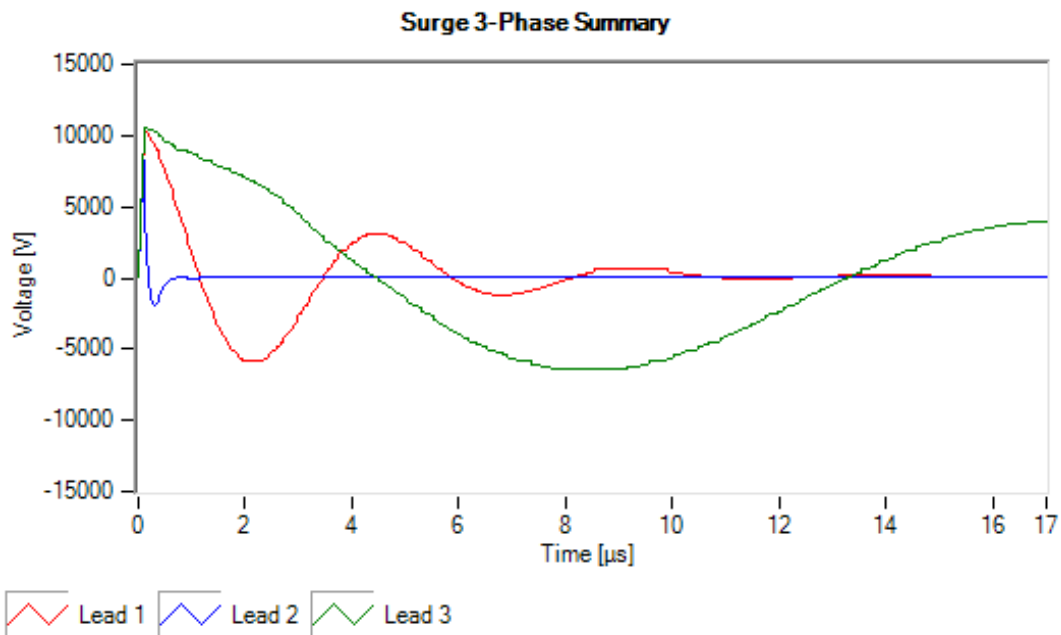
**Obrázek 19. Porovnání průběhů rázové zkoušky – motor 3**

### 3.1.3.1 Vyhodnocení

Jak je možno vidět z Obrázků 17.-19., u všech motorů dochází v jednotlivých fázích k přibližně stejnému odeznívání proudových impulzů. Největší odchylka byla naměřena u motoru 3, a sice 6 %. Tato hodnota s rezervou vyhovuje mezní hodnotě odchylky 10 % a nelze tedy u žádného z motorů ani vzdáleně usuzovat na existenci zkratových proudů uvnitř stroje. Pro ilustraci, následující Tabulka 10. a Obrázek 20. zachycují změny hodnot obvodových prvků a průběhu rázové zkoušky při mezizávitových zkratech ve fázích 2 a 3. U poruchového motoru došlo ke zjištění výrazných odchylek velikostí indukčnosti a zkouška se následně zkrátila pouze na provedení rázové zkoušky, která prokázala rozdíl v tlumení proudových pulzů s rozdílem 100 %. Následná vizuální kontrola izolace po rozložení stroje potvrdila existenci mezizávitových zkratů.

**Tabulka 10. Změřené hodnoty R, L – poruchový motor**

Motor se zkratem						
Odpor		L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	L <sub>3</sub> -L <sub>1</sub>	Odchylka (%)	Průměr
Stejnoseměrný odpor	R (mΩ)	203,43	205,66	206,40	0,8	205,16
Indukčnost		L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	L <sub>3</sub> -L <sub>1</sub>	Odchylka (%)	Průměr
Frekvence	f (Hz)	60	60	60		
Reaktance	X <sub>L</sub> (mΩ)	6,491	7,61	8,188	12,6	7,430
Indukčnost	L (mH)	13,338	18,969	20,911	24,8	17,739



Obrázek 20. Porovnání průběhů rázové zkoušky

### 3.2 Podpisová analýza statorových proudů

V následujících odstavcích bude provedena podpisová analýza statorových proudů čtyř typově totožných asynchronních strojů vysokého výkonu (motory 4-7) se štítkovými hodnotami viz. Tabulka 10. Tyto motory jsou na druhém výrobním bloku jaderné elektrárny Temelín používány pro pohon hlavních cirkulačních čerpadel. Stator je zapojen do trojúhelníku a z důvodu odběru vysokého záběrného proudu jsou stroje opatřeny přepínačem Y/D.

Tabulka 11. Štítkové a technické hodnoty analyzovaných strojů

Jmenovitý výkon	$P_n$	(MW)	8
Jmenovitý proud	$I_n$	(kA)	880
Jmenovité napětí	$U$	(kV)	6
Frekvence	$f$	(Hz)	50
Účinník	$\cos\varphi$	(-)	0,91
Účinnost	$\eta$	(%)	96
Nominální otáčky	$n_n$	( $\text{min}^{-1}$ )	994
Jmenovitý skluz	$s_n$	(%)	0,6
Počet pólových dvojic	$p$	(-)	3
Počet rotorových tyčí	$Q$	(-)	112

Podpisová analýza se zde využívá již řadu let pro kontrolu a monitorování stavu jednotlivých strojů důležitých z hlediska provozuschopnosti a bezpečnosti jaderného zařízení.

Na jednotlivých strojích byl vždy změřen proud jedné fáze po dobu 180 sekund prostřednictvím mobilní monitorovací ústředny MMU-K na platformě MOSAD@5 (viz. Příloha C). Vzhledem ke skutečnosti, že frekvenční spektra proudů ostatních fází jsou takřka totožná, stačí pro každý stroj měřit proud pouze jedné fáze.

Měřicí ústředna MMU-K byla osazena řídicí kartou a měřicími analogovými kartami pro 8 vstupů s nastavenou snímací frekvencí 50 kHz.

Pro přizpůsobení proudových signálů byl použit klešťový transformátor PK 200 a bočník, na kterém došlo k vytvoření napětového výstupu pro vstup měřící karty. Tato kombinace se využívá s účelem zajistit co možná nejnížší chybu měření, která se v případě použití bočníku omezí pouze na měřicí chybu proudového transformátoru. Pro výpočet frekvenčního spektra proudu je totiž velice důležitá nejvyšší možná přesnost záznamu okamžitých hodnot proudu. Stěžejními vlastnostmi bočníku jsou proto co možná nejnížší indukčnost (ideálně nulová) a nízký elektrický odpor. Vzhledem ke skutečnosti, že měřené okamžité hodnoty proudu jsou vyšší, než 500 A, je na této úrovni přesnost měřícího transformátoru více než dostatečná.

**Tabulka 12. Chybovost proudového transformátoru PK 200**

$I_{\text{prim}}$	$I_{\text{sec}}$	$R_{\text{max}}$	Chyba proudu	Chyba úhlu
(A)	(mA)	( $\Omega$ )	(%)	(°)
10-100	1-10	5000	1,5	3
		3000	1	2
100-300	10-30	2000	1	2
300-1000	30-100	800	0,5	1,5

Zpracování dat z měření, tedy export do .txt souboru, byl proveden vyhodnocovacím software GRAF sloužící pro matematické zpracování a grafické zobrazení naměřených dat. Takovéto měření probíhá na Temelínské elektrárně opakovaně již několik let, nabízí se proto možnost zpracování dat naměřených v průběhu několika let jako ukazatel případných změn v průběhu životnosti jednotlivých strojů. Použité průběhy okamžitých hodnot proudů byly změřeny v letech 2016 až 2018.

Ke zpracování a vyhodnocení dokumentů byl zvolen software Matlab, který podporuje import textových souborů, nabízí funkci rychlé Fourierovy transformace a který je rovněž vhodný ke grafickému znázornění výsledků.

Pro výpočet frekvencí, na kterých by se případné poruchy mohly projevit, je stěžejní znalost hodnoty skluzu stroje, při které stroj během měření pracoval.

Měření se provádělo přímo za chodu stroje a ze zřejmých důvodů (konečné konstrukční možnosti, vliv zátěže, vliv napájení atd.) se liší efektivní hodnoty odebíraných proudů jednotlivých strojů, a tedy každý stroj pracoval při mírně odlišné hodnotě skluzu. Zatížení rovněž při provozu stroje lehce kolísá, což znamená jistou, avšak poměrně malou fluktuaci otáček a skluzu během provozu stroje. Tato skutečnost nicméně do měření i vyhodnocování zanáší určitou, poměrně těžko definovatelnou chybu.

### 3.2.1 Odhad hodnoty skluzu stroje

Podle [31] by měla být velikost proudu naprázdno pro šesti-pólový asynchronní stroj v rozmezí 33-45 % jmenovité hodnoty proudu.

Po konzultaci s panem doc. Ing. Čestmírem Ondrůškem, CSc. (VUT FEKT) došlo k odhadu hodnoty proudu naprázdno a skluzu následujícím způsobem. Ztráty naprázdno u tohoto typu stroje při účinnosti 96 % odpovídají přibližně hodnotě 2 % celkového příkonu při účinnu naprázdno 0,049.

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta} = \frac{8 \cdot 10^6}{0,96} = 8,33 \text{ MW} \quad (31)$$

$$\Delta P_0 \cong 2 \cdot \frac{P_1}{100} = 2 \cdot \frac{8,33 \cdot 10^6}{100} = 16,67 \cdot 10^4 = 166,7 \text{ kW} \quad (32)$$

proud naprázdno potom získáme následujícím vztahem

$$I_0 = \frac{\Delta P_0}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi_0} = \frac{16,67 \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,049} = 327,36 \text{ A} \quad (33)$$

Takto vypočtená hodnota proudu naprázdno odpovídá 37,2 % jmenovité hodnoty proudu stroje.

Dále je nutno spočítat rozdíl jmenovité hodnoty proudu a proudu naprázdno

$$\Delta I_1 = I_n - I_0 = 880 - 327,36 = 552,64 \text{ A} \quad (34)$$

Rovněž je nutno spočítat rozdíl efektivní hodnoty proudu a proudu naprázdno, podle kterého budeme určovat výslednou hodnotu skluzu během měření

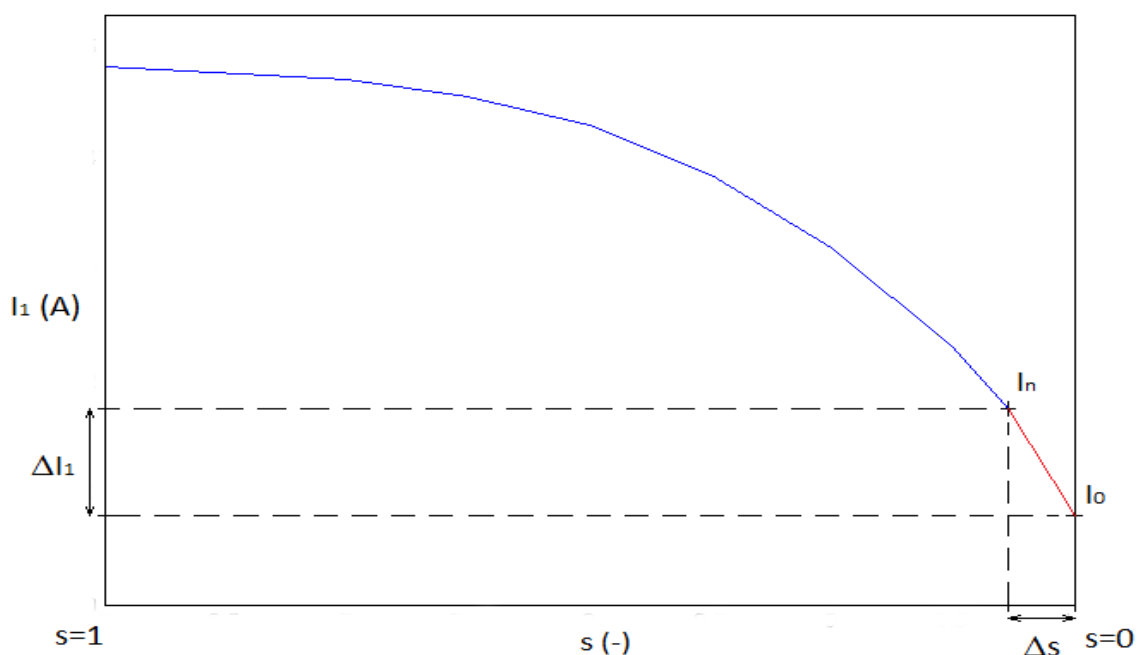
$$\Delta I_2 = I_{RMS} - I_0 = 546,89 - 327,36 = 219,53 \text{ A} \quad (35)$$

$$\Delta s = s_1 - s_0 = 0,6 - 0 = 0,6 \% \quad (36)$$

Vzhledem ke skutečnosti, že změřené průběhy proudu byly měřeny až po ustálení stroje, odpovídají tyto průběhy části závislosti proudu na skluzu (Obrázek 21) za jmenovitým bodem. Je tedy možno tuto část jinak nelineární závislosti považovat za přibližně lineární. Potom přibližně platí i úměra mezi  $\Delta I_1$  a  $\Delta s$ .

$$s_1 = \frac{\Delta s}{\Delta I_1} \cdot \Delta I_2 = \frac{0,6}{552,64} \cdot 219,53 = 0,238 \% \quad (37)$$

Použité číselné hodnoty odpovídají konkrétnímu měření a postupu výpočtu skluzu.



**Obrázek 21. Závislost velikosti statorového proudu na skluzu**

Hodnota skluzu byla vždy vypočtena pro všechny 4 stroje z měření v průběhu jednotlivých let.

**Tabulka 13. Výpočet skluzu z měření v roce 2016**

Motor 4 (2016)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	546,89	552,64	219,53	0,238
Motor 5 (2016)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	554,90	552,64	227,54	0,247
Motor 6 (2016)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	518,33	552,64	190,97	0,207
Motor 7 (2016)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	554,52	552,64	227,16	0,247

**Tabulka 14. Výpočet skluzu z měření v roce 2017**

Motor 4 (2017)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	546,39	552,64	219,03	0,238
Motor 5 (2017)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	523,18	552,64	195,82	0,213
Motor 6 (2017)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	513,59	552,64	186,23	0,202
Motor 7 (2017)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	547,96	552,64	220,60	0,240

**Tabulka 15. Výpočet skluzu z měření v roce 2018**

Motor 4 (2018)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	538,85	552,64	211,49	0,230
Motor 5 (2018)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	517,17	552,64	189,81	0,206
Motor 6 (2018)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	508,62	552,64	181,26	0,197
Motor 7 (2018)					
$I_0$	$I_n$	$I_{RMS}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$s_1$
(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(%)
327,36	880,00	542,35	552,64	214,99	0,233

Teoreticky by mělo platit, že poruchy se nejvíce projeví při jmenovitém zatížení stroje, tedy při nominálním skluzu. Naopak u nezatíženého stroje s přibližně nulovým skluzem není možné poruchy dostatečně přesně odhalit, protože by se projevovaly v bezprostřední blízkosti hodnoty napájecí frekvence 50 Hz. Tato



skutečnost je zřejmá i z výpočtových vztahů při dosazení  $s_1=0$ . Procentuální zatížení při měřeních v jednotlivých letech jsou uvedena v Tabulce 16.

**Tabulka 16. Hodnoty zatížení během jednotlivých měření**

	Zatížení stroje během měření (%)		
	2016	2017	2018
M1	62,15	62,09	61,23
M2	63,06	59,45	58,77
M3	58,90	58,36	57,80
M4	63,01	62,27	61,63

Je patrné, že pro zvýraznění poruchových frekvencí by bylo vhodné stroje ještě více zatížit, avšak v praktických podmínkách většinou nelze tuto skutečnost ovlivnit. Zatížení okolo 60 % je nicméně pro podpisovou analýzu veskrze dostatečné.

### 3.2.2 Výpočet hledaných poruchových frekvencí pro podpisovou analýzu

Metoda podpisové analýzy statorových proudů je citlivá a vhodná zejména k odhalení poruch rotoru, jako jsou excentricity, špatné ustavení stroje a poruchy rotorového vinutí. Výpočet kritických frekvencí pro tuto metodu tak vychází z již uvedených vztahů (10), (17) a (18). Výsledné hodnoty frekvencí byly určeny pro jednotlivé hodnoty skluzu zjištěné z měření a následně vycentrovány, jelikož u některých strojů došlo během měření ke změně síťové frekvence  $f_1=50\pm0,01$  Hz. Konkrétní velikost napájecí frekvence se následně promítne do frekvenčního spektra a veškerá hledaná pásma jsou v důsledku náležitě posunuta.

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, kritické frekvence odpovídající excentricitám je možno odhalit na nižších a vyšších hodnotách kmitočtu, budou zde proto obě tyto možnosti prošetřeny.

Délka okna pro zkoumání frekvenčního spektra z hlediska jednotlivých poruch byla zvolena tak, aby byla zachována výpovědní hodnota a současně, aby bylo vyneseno co možná největší množství zkoumaných frekvencí.

Následující Tabulky 17-18 obsahují hodnoty frekvenčních pásem odpovídajících excentricitám pro nižší kmitočty až po 27. harmonickou, tedy přibližně po kmitočty rovný 500 Hz, a následně pro kmitočty vyšší až po 22. harmonickou odpovídající rozsahu 750 Hz až 3 kHz. V Tabulce 19 jsou uvedeny kritické frekvence pro poruchu rotorových tyčí, které jsou typicky vyneseny v rozsahu  $50\pm4$  Hz.

**Tabulka 17. Hodnoty frekvenci odpovídajících excentricitám (nižší hodnoty)**

Excentricita - nízké kmitočty								
n	s <sub>1</sub> =0,238 %		s <sub>1</sub> =0,247 %		s <sub>1</sub> =0,207 %		s <sub>1</sub> =0,213 %	
(-)	f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)	
1	66,627	33,373	66,626	33,375	66,632	33,368	66,631	33,369
2	83,254	16,746	83,251	16,749	83,264	16,736	83,262	16,738
3	99,881	0,119	99,877	0,124	99,897	0,104	99,894	0,106
4	116,508		116,502		116,529		116,525	
5	133,135		133,128		133,161		133,156	
6	149,762		149,753		149,793		149,787	
7	166,389		166,379		166,425		166,418	
8	183,016		183,004		183,057		183,049	
9	199,643		199,630		199,690		199,681	
10	216,270		216,255		216,322		216,312	
11	232,897		232,881		232,954		232,943	
12	249,524		249,506		249,586		249,574	
13	266,151		266,132		266,218		266,205	
14	282,778		282,757		282,850		282,836	
15	299,405		299,383		299,483		299,468	
16	316,032		316,008		316,115		316,099	
17	332,659		332,634		332,747		332,730	
18	349,286		349,259		349,379		349,361	
19	365,913		365,885		366,011		365,992	
20	382,540		382,510		382,643		382,623	
21	399,167		399,136		399,276		399,255	
22	415,794		415,761		415,908		415,886	
23	432,421		432,387		432,540		432,517	
24	449,048		449,012		449,172		449,148	
25	465,675		465,638		465,804		465,779	
26	482,302		482,263		482,436		482,410	
27	498,929		498,889		499,069		499,042	

**Tabulka 18. Hodnoty frekvenci odpovídajících excentricitám (vyšší hodnoty)**

Excentricita - vysoké kmitočty								
n	s <sub>1</sub> =0,238 %		s <sub>1</sub> =0,247 %		s <sub>1</sub> =0,207 %		s <sub>1</sub> =0,213 %	
(-)	f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)	
1	1912,22	1812,22	1912,06	1812,06	1912,80	1812,80	1912,69	1812,69
2	1962,22	1762,22	1962,06	1762,06	1962,80	1762,80	1962,69	1762,69
3	2012,22	1712,22	2012,06	1712,06	2012,80	1712,80	2012,69	1712,69
4	2062,22	1662,22	2062,06	1662,06	2062,80	1662,80	2062,69	1662,69
5	2112,22	1612,22	2112,06	1612,06	2112,80	1612,80	2112,69	1612,69

Excentricita - vysoké kmitočty								
n	s <sub>1</sub> =0,238 %		s <sub>1</sub> =0,247 %		s <sub>1</sub> =0,207 %		s <sub>1</sub> =0,213 %	
(-)	f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)	
6	2162,22	1562,22	2162,06	1562,06	2162,80	1562,80	2162,69	1562,69
7	2212,22	1512,22	2212,06	1512,06	2212,80	1512,80	2212,69	1512,69
8	2262,22	1462,22	2262,06	1462,06	2262,80	1462,80	2262,69	1462,69
9	2312,22	1412,22	2312,06	1412,06	2312,80	1412,80	2312,69	1412,69
10	2362,22	1362,22	2362,06	1362,06	2362,80	1362,80	2362,69	1362,69
11	2412,22	1312,22	2412,06	1312,06	2412,80	1312,80	2412,69	1312,69
12	2462,22	1262,22	2462,06	1262,06	2462,80	1262,80	2462,69	1262,69
13	2512,22	1212,22	2512,06	1212,06	2512,80	1212,80	2512,69	1212,69
14	2562,22	1162,22	2562,06	1162,06	2562,80	1162,80	2562,69	1162,69
15	2612,22	1112,22	2612,06	1112,06	2612,80	1112,80	2612,69	1112,69
16	2662,22	1062,22	2662,06	1062,06	2662,80	1062,80	2662,69	1062,69
17	2712,22	1012,22	2712,06	1012,06	2712,80	1012,80	2712,69	1012,69
18	2762,22	962,22	2762,06	962,06	2762,80	962,80	2762,69	962,69
19	2812,22	912,22	2812,06	912,06	2812,80	912,80	2812,69	912,69
20	2862,22	862,22	2862,06	862,06	2862,80	862,80	2862,69	862,69
21	2912,22	812,22	2912,06	812,06	2912,80	812,80	2912,69	812,69
22	2962,22	762,22	2962,06	762,06	2962,80	762,80	2962,69	762,69

**Tabulka 19. Hodnoty frekvencí odpovídajících poruchám rotorových tyčí**

Rotorové tyče								
n	s <sub>1</sub> =0,238 %		s <sub>1</sub> =0,247 %		s <sub>1</sub> =0,207 %		s <sub>1</sub> =0,213 %	
(-)	f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)	
1	50,258	49,782	50,239	49,745	50,217	49,803	50,213	49,787
2	50,496	49,544	50,486	49,498	50,424	49,596	50,426	49,574
3	50,734	49,306	50,733	49,251	50,631	49,389	50,639	49,361
4	50,972	49,068	50,980	49,004	50,838	49,182	50,852	49,148
5	51,210	48,830	51,227	48,757	51,045	48,975	51,065	48,935
6	51,448	48,592	51,474	48,510	51,252	48,768	51,278	48,722
7	51,686	48,354	51,721	48,263	51,459	48,561	51,491	48,509
8	51,924	48,116	51,968	48,016	51,666	48,354	51,704	48,296
9	52,162	47,878	52,215	47,769	51,873	48,147	51,917	48,083
10	52,400	47,640	52,462	47,522	52,080	47,940	52,130	47,870
11	52,638	47,402	52,709	47,275	52,287	47,733	52,343	47,657
12	52,876	47,164	52,956	47,028	52,494	47,526	52,556	47,444
13	53,114	46,926	53,203	46,781	52,701	47,319	52,769	47,231
14	53,352	46,688	53,450	46,534	52,908	47,112	52,982	47,018
15	53,590	46,450	53,697	46,287	53,115	46,905	53,195	46,805
16	53,828	46,212	53,944	46,040	53,322	46,698	53,408	46,592

Tabulky vypočtených kritických frekvencí pro ostatní hodnoty skluzu odpovídající jednotlivým měřením v průběhu několika let jsou uvedeny na konci práce v části Příloha A.

Veškeré hodnoty z tabulek byly uloženy do textových dokumentů a importovány do prostředí Matlab zvlášť pro jednotlivé stroje a jejich frekvenční spektra. Podle konkrétní hodnoty skluzu a případného posunu vlivem napájecí frekvence byly na základě vypočtených kritických hodnot kmitočtu do spekter vloženy linie pro znázornění pásem, na kterých by se mohly projevit případné poruchy.

### 3.2.3 Vztažené hodnoty amplitud

Aby bylo možné přehledně porovnávat výšku signálu v jednotlivých bodech frekvenčního spektra, byly v Matlabu po aplikaci rychlé Fourierovy transformace všechny vypočtené amplitudy vztaženy k amplitudě na první harmonické, tedy 50 Hz, následujícím způsobem

$$I_{abs} = |I_{FFT}| \quad (38)$$

kde  $I_{FFT}$  reprezentuje matici výsledků Fourierovy transformace v komplexním tvaru a  $I_{abs}$  je potom výsledná velikost vektorů uložených ve zmíněné matici získaná principem Pythagorovy věty.

Referenční velikost byla vybrána pomocí funkce max

$$I_{ref} = \max(I_{abs}) \quad (39)$$

a jednotlivé velikosti vztažené proti první harmonické pak byly získány

$$I_{vztaž} = 20 \cdot \log_{10} \frac{I_{abs}}{I_{ref}} \quad (40)$$

Vzhledem ke skutečnosti, že amplituda na první harmonické je o několik řádů vyšší než u zbytku signálu, bylo vhodně využito logaritmické měřítko pro osu Y a amplitudy tak byly vynášeny v decibelech (dB). Poměr amplitud vyjádřených v decibelech znázorňuje Tabulka 20.

**Tabulka 20. Poměr amplitud a jejich ekvivalent v dB**

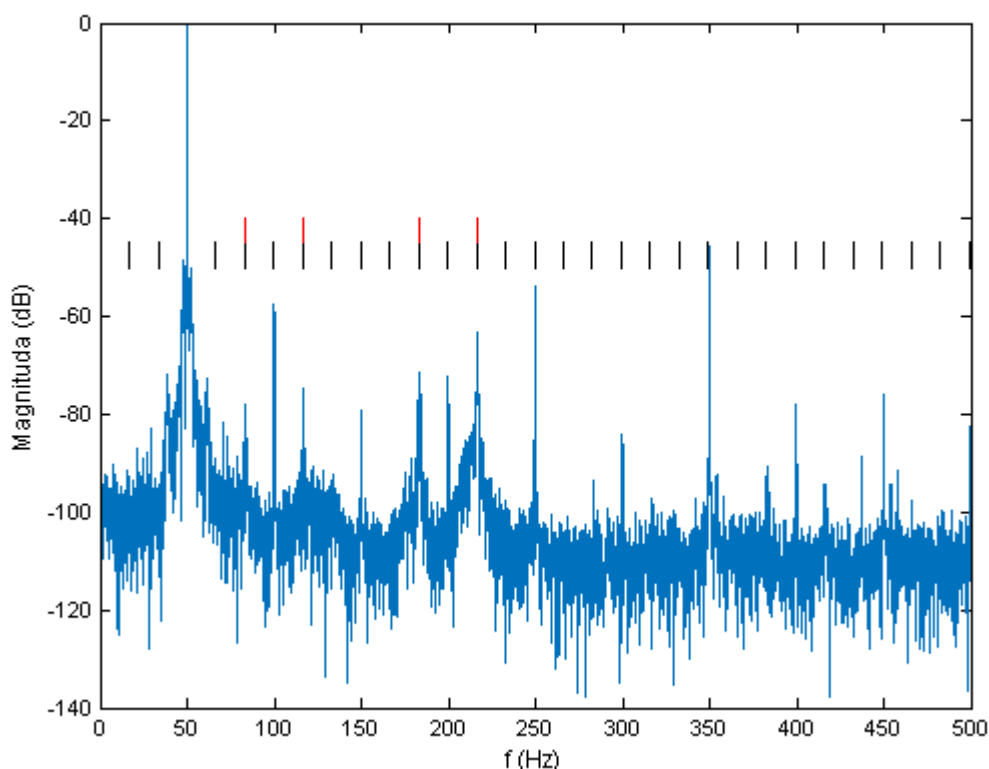
dB	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Poměr amplitud	1	3,1623	10	31,623	100	316,23	1000	3162,3	10000	31623	100000

Pro vyjádření hodnot v záporných decibelech je poměr amplitud převrácenou hodnotou poměrů uvedených v tabulce, tedy např. pro -10 dB je ekvivalentní poměr  $1 \div 3,1623$ .

### 3.2.4 Výsledky podpisové analýzy

Pro vynesení frekvenčního spektra byl vytvořen skript v softwaru Matlab, který je vložen v příloze B. Předpokladem tohoto skriptu bylo načtení zdrojového textového souboru s uloženými okamžitými hodnotami proudu, následné zpracování těchto hodnot, aplikace okénkování, proces rychlé Fourierovy transformace a vynesení výsledných frekvenčních spekter pro jednotlivé možné poruchy s patřičným zaznačením sledovaných hodnot kmitočtu. Na začátku každého cyklu byl nejprve vyneseno spektrogram, který ilustruje časovou závislost jednotlivých hodnot frekvencí, a tedy v sobě uchovává časovou informaci při transformaci mezi časovou a frekvenční oblastí.

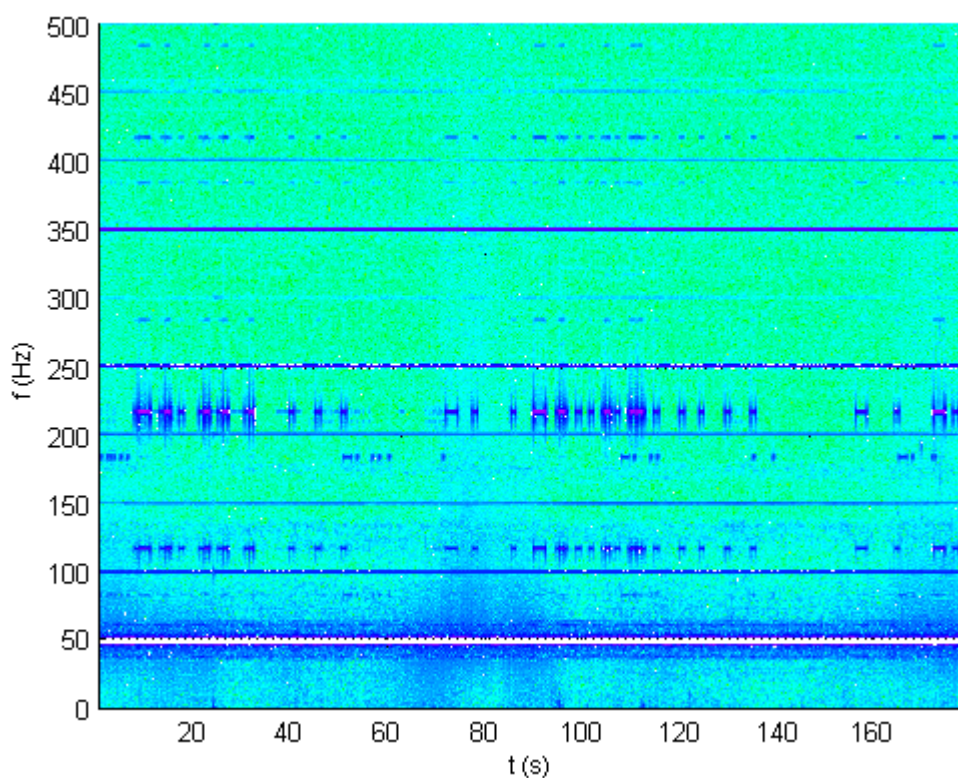
V průmyslové VN síti 6 kV, ze které jsou pohony hlavních cirkulačních čerpadel napájeny, dochází vlivem vazeb silového vedení a provázanosti sítě k častému a velice výraznému zkreslení měřeného proudu vlivem injecktáže užitečných řídicích signálů hromadného dálkového ovládání. Zejména pak na frekvenci 216,66 Hz. Tato skutečnost je poměrně důležitá, neboť se projevy HDO v některých případech mohou shodovat se sledovanými pásmy a falešně tak mohou indikovat např. výraznou excentricitu stroje, viz. Obrázek 22. Indikovaná poruchová pásma odpovídající excentricitě jsou vyznačena červenou linkou.



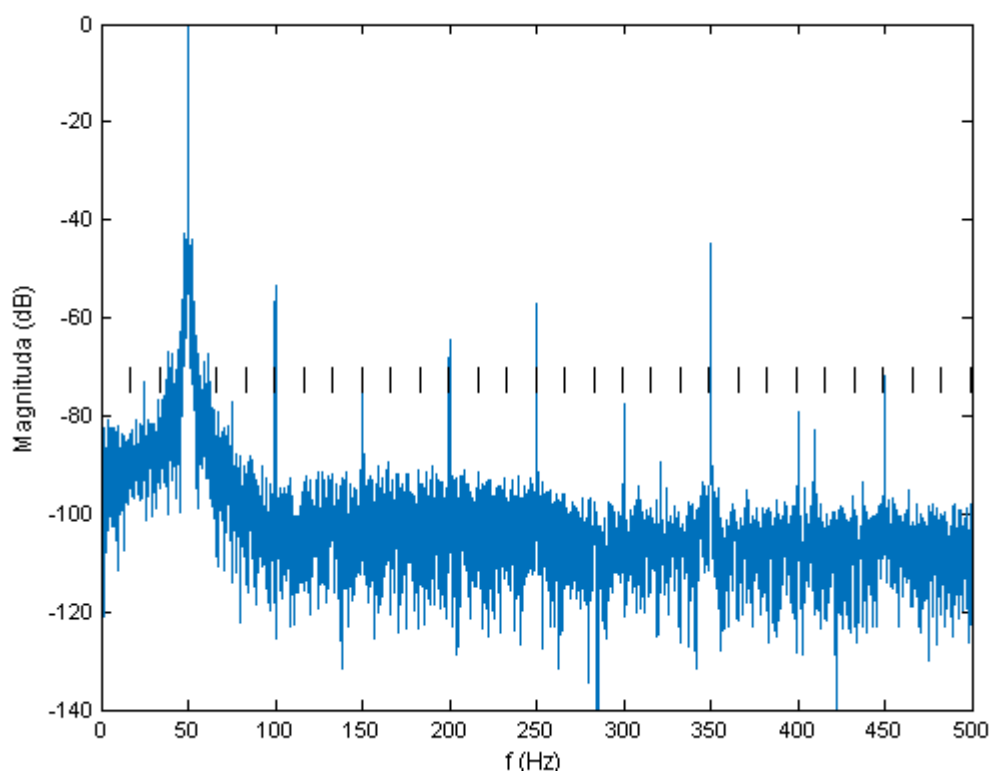
Obrázek 22. Zkreslení spektra vlivem signálu HDO – motor 5 (2016)

Spektrogram motoru 5 (Obrázek 23) tak dává nahlédnout, kdy a na jak dlouho došlo k prezenci konkrétních hodnot frekvence. Je tedy možné pro účely vynášení spekter zvolit vhodný úsek měření, kdy nebyl přítomen signál HDO nebo jakýkoliv jiný přechodný jev způsobený spíše sítí než samotným strojem, či vlivem zátěže. Obrázek 24 pak znovu znázorňuje spektrum excentricit na nízkých kmitočtech motoru 5, tentokrát však s časovým úsekem pro Fourierovu transformaci zvoleným tak, aby byl eliminován vliv hromadného dálkového ovládání. Spektrum je čisté a projevují se v něm pouze harmonické složky, nejedná se tedy o stroj zatížený excentricitou, jak by se prve mohlo zdát.

Zvýšení amplitudy spektra na hodnotě frekvence odpovídající poruše nemusí tedy vždy nutně znamenat existenci poruchy. Podpisová analýza je velice přesnou metodou, vždy v proudovém spektru odhalí veškerou interferenci stroje, správné vyhodnocení poruch je však velmi závislé na zkušenostech osoby provádějící diagnostiku či případně na nastavení diagnostického zařízení.



**Obrázek 23. Spektrogram - motor 5 (2016)**

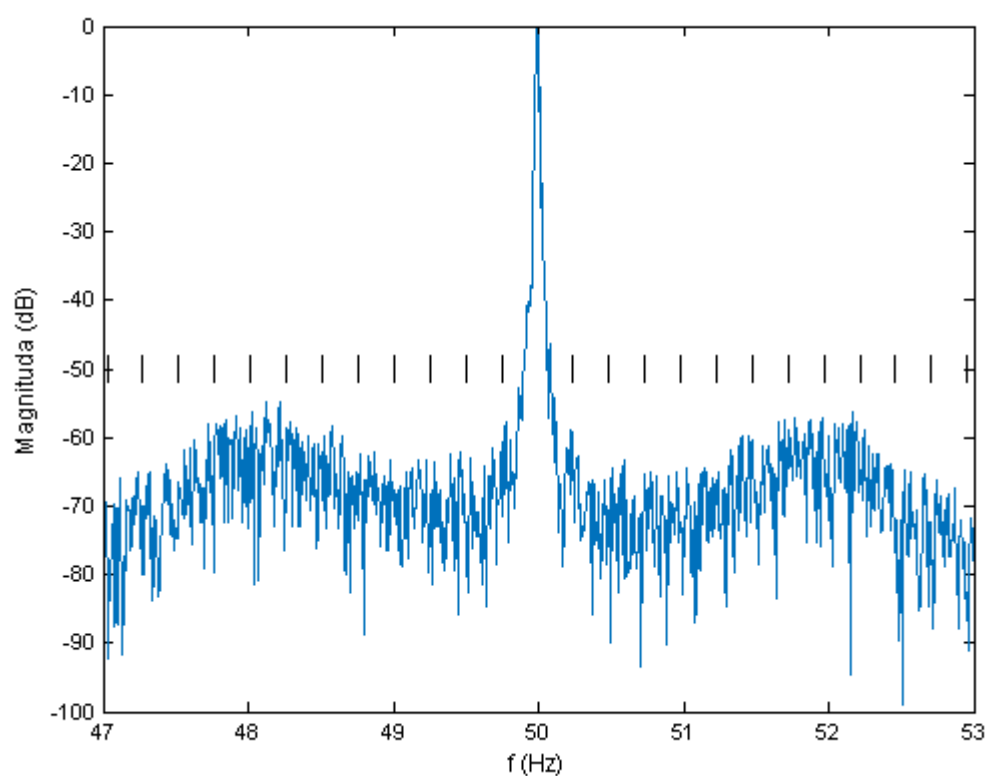


**Obrázek 24. Spektrum bez vlivu HDO - motor 5 (2016)**

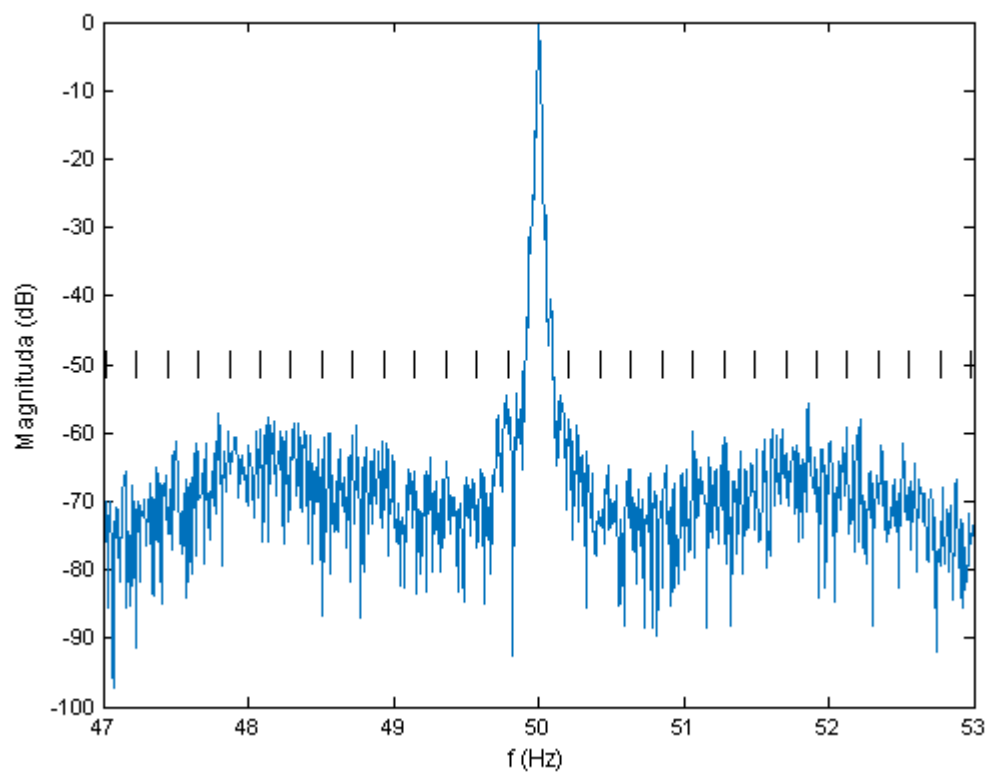
U některých motorů se nepodařilo najít dostatečně dlouhé okno bez projevující se injektáže a vliv HDO nebylo možné úplně eliminovat. V konkrétních případech se ve vynesných spektrech dále mohou objevovat mírná odpovídající pásma.

Délka signálu pro vynášení frekvenčních spekter byla volena s ohledem na potřebné frekvenční rozlišení. Pro rozbor rotorových tyčí v blízkém okolí první harmonické bylo vždy vybráno  $2^{23}$  vzorků, což při vzorkovací frekvenci 50 kHz odpovídá přibližně 168 s, čímž bylo docíleno vysokého rozlišení. Naproti tomu pro analýzu excentricit v okně o značné délce není vysoké rozlišení nutné. Je tedy možno zvolit kratší časový úsek, konkrétně třeba  $2^{19}$  vzorků, což odpovídá přibližně 10,5 s. Tímto se naopak docílí větší stálosti signálu v časové oblasti a odpovídající data mají vyšší výpovědní hodnotu, jelikož se proměnlivosti tolik neprojeví.

U motoru 5 se při měření roku 2018 projeví mírně zvýšené úrovně ve spektru rotorových tyčí odpovídající pásma  $n=1$ . Zpětně je možno sledovat vývoj daného pásma v rozmezí let 2016-2018, kdy je zřejmý postupný růst amplitudy na tomto pásma. Zmíněný vývoj je zachycen na Obrázku 25-27. V posledním zmíněném Obrázku 27 došlo k posunutí linií charakterizující možné poruchové frekvence k vyšším hodnotám tak, aby nezasahovaly do průběhu spektra.

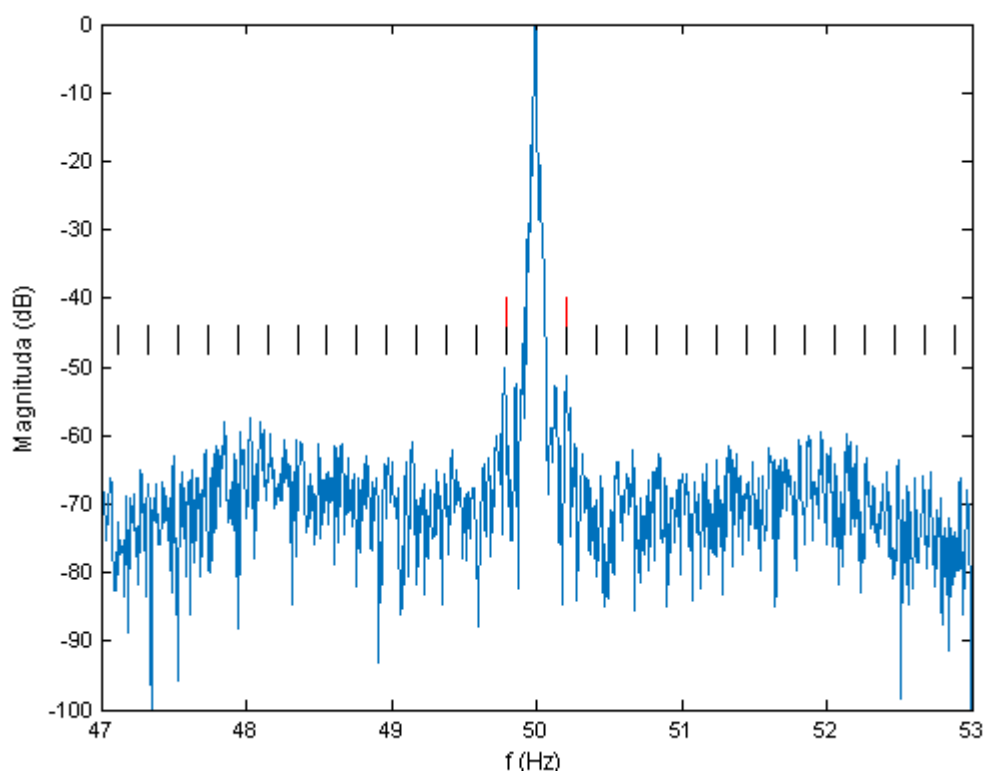


**Obrázek 25. Spektrum rotorových tyčí - motor 5 (2016)**



**Obrázek 26. Spektrum rotorových tyčí - motor 5 (2017)**

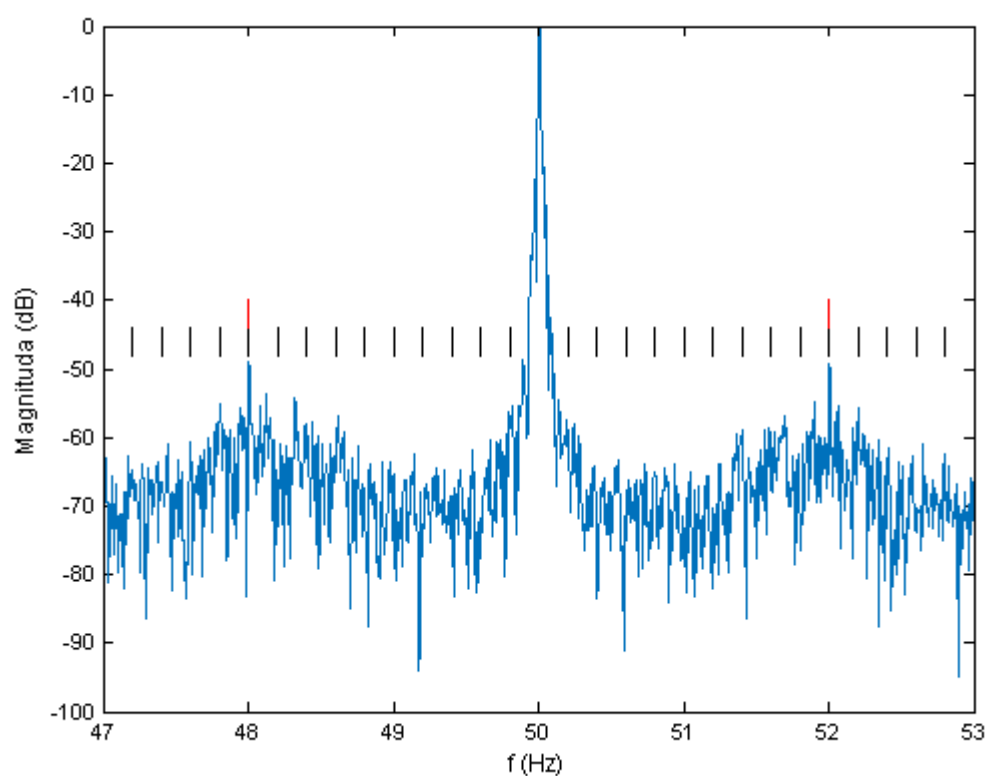




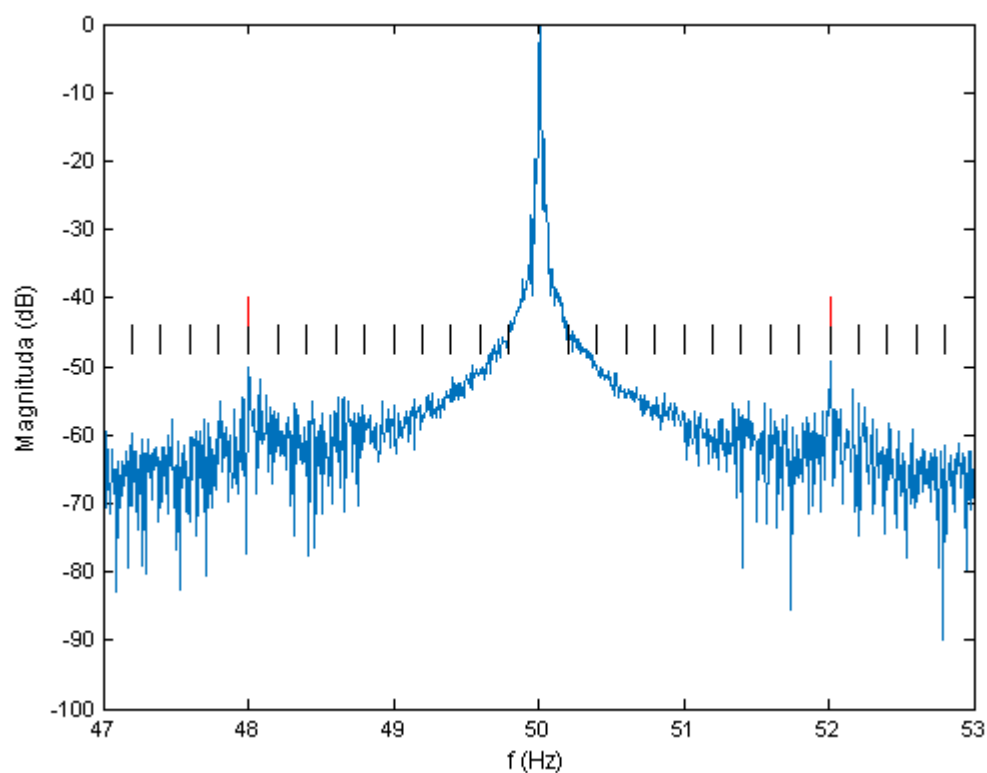
**Obrázek 27. Spektrum rotorových tyčí - motor 5 (2018)**

Obdobnou změnu ve spektru rotorových tyčí v rozmezí několika let lze pozorovat i u motoru 6, u kterého se při měření roku 2017 projeví mírně zvýšené úrovně na pásnu odpovídajícím  $n=10$ , tento stav ilustruje Obrázek 28. Mohlo by se jednat o lehkou, začínající poruchu rotorových tyčí, nicméně je nutné mít na paměti vliv použitého Hannova okna, které výsledný tvar spektra výrazně ovlivní. Byl tedy pro porovnání použit výstup pouze Fourierovy transformace (Obrázek 29), bez aplikace oken, který existenci zmíněného pásma potvrzuje. Totožný rozbor rotorových tyčí motoru 6 byl proveden i v roce 2018, kdy spektrum opět vykazuje lehce zvýšená pásma odpovídající  $n=9,10$ , viz. Obrázek 30. Projev poruchy rotorových tyčí pouze na pásmech  $n=9,10$  je však poměrně nepravděpodobný a bylo by vhodné stroj v tomto ohledu dále sledovat.

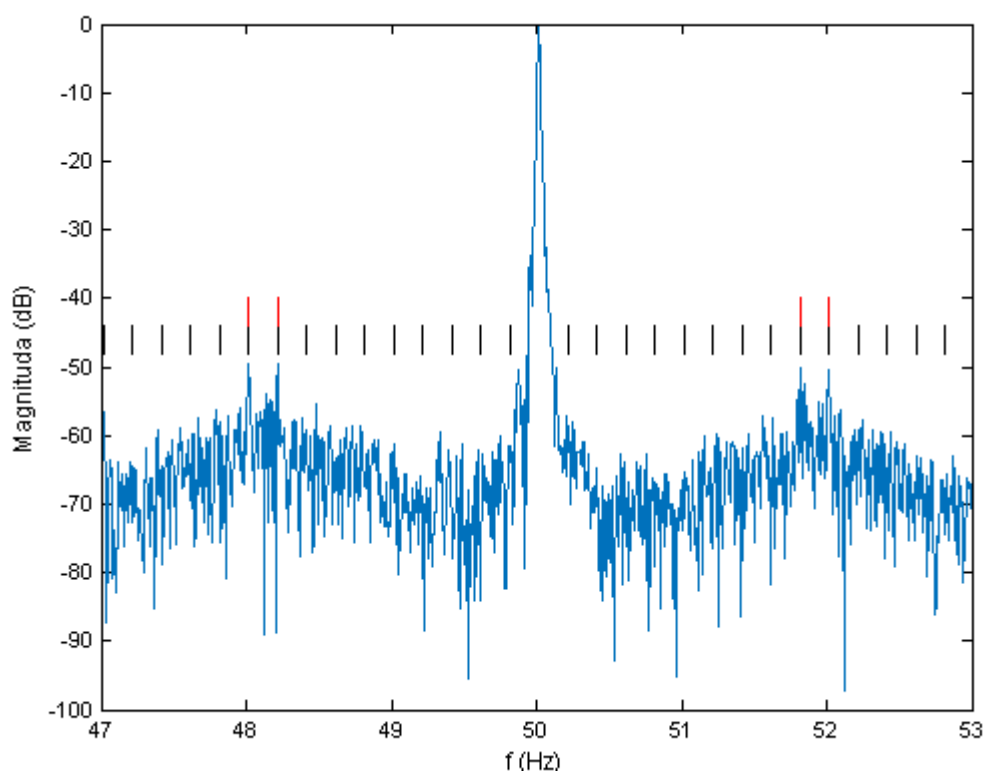
U rotorových tyčí je běžné poměrně rychlé šíření poruchy, kdy v důsledku snížení odporu jedné tyče dochází k přetěžování tyčí okolních. V praxi se rozšíření poruchy může projevit právě zvýšením amplitudy na daném pásnu či na více pásmech zároveň. Je však nutno zmínit, že poměr amplitud na zjištěných poruchových pásmech oproti první harmonické je přibližně -50 dB, což podle [23] stále odpovídá průměrnému stavu stroje. Tato hodnota je však poměrně hraniční, neboť při poměru amplitud -48 dB může již být zhodnocení odlišné a poukazovat tak na formující se poruchu rotorové tyče nebo i několika tyčí zároveň.



**Obrázek 28. Spektrum rotorových tyčí - motor 6 (2017)**



**Obrázek 29. Spektrum rotorových tyčí bez použití okna - motor 6 (2017)**



**Obrázek 30. Spektrum rotorových tyčí - motor 6 (2018)**

Z pohledu excentricit lze konstatovat, že prakticky v každém měření u všech strojů je jistý, avšak jen velmi nepatrný náznak pásem odpovídajících excentricitám. Tento stav je ale možno považovat za zcela normální a bezporuchový.

Pro excentricity na vyšších hodnotách kmitočtu nebyla detekována naprosto žádná poruchová pásma, ačkoliv každý stroj je více či méně zatížen výrobními nedokonalostmi, a tedy ve stroji vždy existuje alespoň mírná nesoustřednost. Z tohoto důvodu budou spektra excentricit na vyšších frekvencích zařazena pouze ilustrativně pro motor 4.

Obecně lze říci, že jsou motory sloužící pro pohon hlavních cirkulačních čerpadel (HCČ) na 2. výrobním bloku jaderné elektrárny Temelín v uspokojivém stavu. U žádného z motorů nebyly měření prokázány alarmující úrovně v žádném z vynesných spekter. Zjištěné indikace vykazují na příslušných kmitočtech pouze nízké úrovně, a tedy nelze usoudit na vážnější poruchu rotorových tyčí ani excentricity. Tato skutečnost je z hlediska provozuschopnosti jednotlivých strojů žádoucí.

Všechna frekvenční spektra získaná měření jsou pro porovnání uložena v příloze na přiloženém CD.

## 4 ZÁVĚR

Předložená práce se zabývá vytvořením teoretického přehledu diagnostiky asynchronních strojů a následnou aplikací teoretických principů v technické praxi. Zvláštní důraz je pak kladen na vysoce výkonné stroje, neboť pořizovací cena strojů nižších výkonů nebývá nikterak závratná a diagnostika se většinou ekonomicky nevyplatí, nebo z časových důvodů nemusí být možná. V případě strojů nízkého výkonu se v praxi většinou poškozený stroj jednoduše nahradí strojem novým.

V praktické části byla nejprve provedena testovací (off-line) diagnostika možných statorových poruch na vybraných asynchronních strojích (motor 1-3) z čerpací stanice Jihlava. Tato čerpací stanice spadá pod jadernou elektrárnu Dukovany. Zmíněné stroje pracují v zapojení do hvězdy a jsou použity pro pohon čerpadel chladící vody do gravitačního zásobníku, odkud je voda dále čerpána do chladících věží. Z hlediska provozu jaderného zařízení se tak jedná o velice důležité stroje. Diagnostika byla provedena pomocí analyzátoru společnosti SKF, který je svými vlastnostmi vhodný pro provedení testování izolačního stavu vinutí. Během analýzy byly stroje podrobeny zkoušce obvodových veličin, kdy došlo ke změření odporu a indukčnosti jednotlivých cívek se záměrem odhalit případné rozdíly v impedanci odkazující na možné zkraty vinutí. Dále byla provedena vysokonapěťová zkouška konstantním stejnosměrným napětím za účelem zjištění maximální izolační schopnosti vinutí jednotlivých strojů podle běžně užívaných ukazatelů. Závěrem provozní diagnostiky pak bylo testování rázovou vlnou, která se využívá pro získání přesvědčivých informací o existujících, případně vznikajících zkratech na vinutí. V této části byl rovněž ilustrován výsledek rázové zkoušky na stroji zatíženém mezizávitovými zkraty.

Testování odhalilo sníženou izolační schopnost u motoru 2, u kterého zjištěný polarizační index a dielektrická absorpce vykazují téměř hraniční hodnoty. Bylo by tedy vhodné tento stroj zahrnout do plánu oprav a nechat jej v nejbližší době převinout. U ostatních strojů nebyla měřením prokázána snížená úroveň izolační schopnosti, a tedy nelze usuzovat na poruchy statorového vinutí.

Dále byla v praktické části v rámci provozní (on-line) diagnostiky aplikována podpisová analýza statorových proudů (MCSA) na čtyři typově totožné asynchronní stroje zapojené do trojúhelníka (motor 4-7) pracující jako pohon hlavních cirkulačních čerpadel (HCČ) na druhém výrobním bloku jaderné elektrárny Temelín. Tato čerpadla čerpají cirkulační vodu z reaktoru do parogenerátoru v primárním okruhu elektrárny, jedná se tedy opět o velice důležitá zařízení. U všech motorů byl pomocí proudového transformátoru a monitorovací ústředny MMU-K sejmuto časový průběh ustáleného statorového proudu jedné fáze se vzorkovací frekvencí 50 kHz po dobu tří minut. Pro zajištění měření zatíženého co

možná nejmenší chybou byl použit bezindukční bočník s účelem získání napětového výstupu pro měřicí kartu zabudovanou v ústředně MMU-K. Totožné měření se na Temelíně provádí již řadu let, bylo proto možné využít průběhů naměřených v letech 2016-2018 k porovnání výsledků a vytvoření časového trendu vývoje technického stavu zkoumaných strojů.

Takto získaný průběh statorového proudu byl importován do prostředí Matlab, kde došlo ke zpracování signálu, aplikace okénkování a převedení průběhu do frekvenční oblasti pomocí funkce rychlé Fourierovy transformace (FFT). Do jednotlivých frekvenčních spekter byly vloženy linie pro vyznačení frekvencí, na kterých by se případné poruchy mohly projevit. Pro výpočet kritických frekvencí, zejména pro spektrum rotorových tyčí, je však důležitá co možná nejpřesněji určená hodnota skluzu. V tomto ohledu došlo v kapitole 3.2.1 k poměrně přesnému odhadu proudu naprázdno a k následnému odvození příslušné hodnoty skluzu. Vzhledem ke skutečnosti, že každý stroj pracuje při mírně odlišné zátěži a je zatížen výrobními nedostatky, liší se i hodnoty skluzu vypočtené pro jednotlivé stroje. V některých případech je však přesná hodnota kritických frekvencí dohledatelná až zpětně z frekvenčního spektra.

Stroje pracující pro pohon HCČ vykazují až na drobné indikace veskrze dobrý technický stav. U motorů 2 a 3 však byla odhalena mírně zvýšená pásma na hodnotách frekvencí odpovídající poruše rotorových tyčí, která se v průběhu let dostala až na úroveň -50 dB. Tento stav lze zhodnotit jako hraniční, kdy se může jednat o vznikající poruchu rotorového vinutí. Bylo by tedy vhodné stav strojů dále monitorovat. Při tomto rozboru se rovněž potvrdil teoretický předpoklad, že vyšší úrovně vykazují pásma získána výpočtem podle vztahu (10) s uvažovaným záporným znaménkem. S ohledem na frekvenční spektra excentricit lze prohlásit, že všechny stroje jsou zatíženy mírnou nesouosostí, která je však vcelku běžná a dá se považovat za normální a bezporuchový stav. Mimo tyto nepatrné signalizace nedošlo k odhalení výraznějších pásem a nelze tedy usuzovat na rozsáhlejší poruchu strojů.

U podpisové analýzy se jako jeden z nejdůležitějších předpokladů jeví rozbor stavu napájecí sítě z hlediska symetrie napájecího napětí a celkového harmonického zkreslení. Stav napájecí sítě totiž může měření a vyhodnocování značně ovlivnit, třebaže se v průmyslové VN síti 6 kV, ze které jsou motory napájeny, výraznější odchylky nepředpokládají. Ze zmíněného důvodu a v důsledku výrazné časové náročnosti rozbor sítě v předložené práci nebyl proveden.

Všechna frekvenční spektra jednotlivých strojů napříč léty 2016-2018 jsou pro porovnání uložena v příloze na přiloženém CD.

# Literatura

- [1] MENTLÍK, Václav a další. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] VDOLEČEK, František. *Spolehlivost a technická diagnostika* [online]. FSI VUT Brno, 2002 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/FSD.pdf>
- [3] *Diagnostika a testování elektronických systémů* [online]. UMEL VUT Brno [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/bdts/index.php/multimedialni-ucebnice-menu/diagnosticky-system>
- [4] KREIDL, Marcel a Radislav Šmíd. *Technická diagnostika*. Praha: BEN, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [5] *Topologický model* [online]. UMEL VUT Brno [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/bdts/index.php/diagnosticky-model/topologicky-model>
- [6] *Základy technické diagnostiky* [online]. KŘÍŽEK, Michal. Plzeň, s. 7 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~krizek4/zcu/podklady/TDS03.pdf>
- [7] SMETANA, Jaroslav. Měření při údržbě pohonů a motorů. *ELEKTRO* [online]. Praha, 2016, **2016**(10) [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/mereni-pri-udrzbe-pohonu-a-motoru-9-cast--2111>
- [8] RAMANA, D. Venkata a S. BASKAR. Diverse fault detection techniques of three-phase induction motor — A review. *2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT)* [online]. IEEE, 2016, 2016, , 1-8 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/ICETT.2016.7873779. ISBN 978-1-5090-3751-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7873779/>
- [9] CHMELÍK, Karel a Jaroslav SOJKA. Ložiskové proudy a jejich degradační působení. *ELEKTRO* [online]. , 1-5 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/loziskove-proudy-a-jejich-degradacni-pusobeni--14367>

- [10] POLAT, A., Y. D. ERTUGRUL a L. T. ERGENE. Static, dynamic and mixed eccentricity of induction motor. In: *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)* [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 284-288 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/DEMPED.2015.7303703. ISBN 978-1-4799-7743-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7303703/>
- [11] FAIZ, Jawad a S.M.M. MOOSAVI. *Eccentricity fault detection – From induction machines to DFIG* [online]. 24. 1. 2015, , 1-11 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115011922>
- [12] PENROSE, Howard W. *Online and offline testing* [online]. [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: [http://www.maintenance.org/fileSendAction/fcType/0/fcOid/399590942962732539/filePointer/399590942964794295/fodoid/399590942964794293/Online\\_and\\_Offline\\_Testing.pdf](http://www.maintenance.org/fileSendAction/fcType/0/fcOid/399590942962732539/filePointer/399590942964794295/fodoid/399590942964794293/Online_and_Offline_Testing.pdf)
- [13] SEERA, Manjeevan, Chee Peng LIM, Dahaman ISHAK a Harapajan SINGH. *Offline and online fault detection and diagnosis of induction motors* [online]. 2013, , 1-15 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2538141>
- [14] POWELL, George A. *Maintanance of Bones bearings* [online]. In: . [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <https://bonesbearings.com/support/maintenance/>
- [15] SOKANSKÝ, Karel. *Diagnostika vybraných poruch asynchronních motorů pomocí proudových spekter* [online]. 2010, , 1-7 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: [www.cmms.cz/archiv-clanku/doc\\_download/36-diagnostika-proudovych-spekter.html](http://www.cmms.cz/archiv-clanku/doc_download/36-diagnostika-proudovych-spekter.html)
- [16] JANOUSEK, Ivo, Josef KOZÁK a Oldřich TARABA. *Technická diagnostika*. Praha: SNTL, 1988.
- [17] BEZDÍČEK, Jan. Diagnostika asynchronních motorů. *AUTOMA* [online]. , 1-6 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: [http://automa.cz/cz/casopis-clanky/diagnostika-asynchronnich-motoru-2004\\_03\\_32229\\_2590/](http://automa.cz/cz/casopis-clanky/diagnostika-asynchronnich-motoru-2004_03_32229_2590/)

- [18] MARMOUCH, Sameh, Tarek AROUI a Yassine KOUBAA. Application of statistical neuronal networks for diagnostics of induction machine rotor faults. *2016 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)* [online]. IEEE, 2016, 2016, , 199-204 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/STA.2016.7952063. ISBN 978-1-5090-3407-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7952063/>
  
- [19] KADANÍK, Petr, Ondřej ČERVINKA a Jiří RYBA. *Kauzální model asynchronního motoru*. ČVUT Praha, FEL, 2000.
  
- [20] SAAD, Khalid a Galina MIRZAEVA. Advanced diagnosis of stator faults in large induction motors based on internal flux measurement. In: *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 1-6 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/IAS.2016.7731931. ISBN 978-1-4799-8397-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7731931/>
  
- [21] KANG, Tae-June, Jongwan KIM, Sang Bin LEE a Chuck YUNG. Experimental Evaluation of Low-Voltage Offline Testing for Induction Motor Rotor Fault Diagnostics. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. IEEE, 2015, 2016, 51(2), s. 1375-1384 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/TIA.2014.2344504. ISBN 978-1-4799-8397-1. ISSN 0093-9994. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6872824>
  
- [22] NANDI, S., S. AHMED a H.A. TOLİYAT. Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages. *IEEE Transactions on Energy Conversion* [online]. 16(3), 253-260 [cit. 2018-03-19]. DOI: 10.1109/60.937205. ISSN 08858969. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/937205/>
  
- [23] THOMSON, William a Ian CULBERT. *Current signature analysis for condition monitoring of cage induction motors: industrial application and case histories* [online]. Hoboken, New Jersey: IEEE Press, 2017 [cit. 2018-03-19]. ISBN 978-1-119-02959-5.
  
- [24] JUNG, Jee-Hoon, Jong-Jae LEE, Bong-Hwan KWON a Chuck YUNG. Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. IEEE, 2006, 2016, 53(6), s. 1842-1852 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/TIE.2006.885131. ISBN 978-1-4799-8397-1. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4016382/>



- [25] SUPANGAT, R., N. ERTUGRUL, W.L. SOONG, D.A. GRAY, C. HANSEN a J. GRIEGER. Broken rotor bar fault detection in induction motors using starting current analysis. In: *2005 European Conference on Power Electronics and Applications* [online]. IEEE, 2005, 2005, **53**(6), 10 pp.-P.10 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/EPE.2005.219402. ISBN 90-75815-09-3. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1665592/>
- [26] DRÁPELA, Jiří. *Kvalita elektrické energie a EMC*. Brno, 2014. Přednáškový materiál. Vysoké učení technické v Brně.
- [27] KRBAN, Pavel. *Rychlá Fourierova transformace* [online]. Plzeň, 2011 [cit. 2018-05-15]. Přednáškový materiál. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: [http://home.zcu.cz/~panek50/TEVS/12\\_prednaska.pdf](http://home.zcu.cz/~panek50/TEVS/12_prednaska.pdf)
- [28] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Vzorkování signálu. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1356-vzorkovani-signalu>
- [29] *User manual - SKF Static Motor Analyzer Baker DX* [online]. SKF USA, 2016 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.skf.com/binary/79-172206/PUB-CM-71-030-v5-EN-Baker-DX-user-manual.pdf>
- [30] SMETANA, Jaroslav. Měření vybraných parametrů izolace. *ELEKTRO* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/mereni-vybranych-parametru-izolace--10875>
- [31] YUNG, Chuck. *No-load Current Basics* [online]. 2005, , 3 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: [https://www.easa.com/sites/files/accreditation\\_program/NoLoadCurrentBasics\\_0205.pdf](https://www.easa.com/sites/files/accreditation_program/NoLoadCurrentBasics_0205.pdf)

## Seznam symbolů, veličin a zkratk

DAR	dielektrická absorpce	
dB	decibel – poměrná logaritmická jednotka	
DFT	diskrétní Fourierova transformace	
FFT	rychlá Fourierova transformace	
HČČ	hlavní cirkulační čerpadlo	
HDO	hromadné dálkové ovládání	
MCSA	podpisová analýza statorového proudu (motor current signature analysis)	
MMF	magnetomotorická síla (magnetomotoric force)	
PI	polarizační index	
VN	vysoké napětí	
$\beta$	úhel naklonění osy rotace valivého elementu ložiska	[°]
$\Delta f$	frekvenční rozlišení	[Hz]
$\Delta P_0$	ztráty naprázdno	[W]
$\Delta s$	rozsah skluzu stroje	[%]
$\Psi_A$	spřažený magnetický tok fáze A	[Wb]
$\Psi_{kA}$	spřažený magnetický tok závitů nakrátko ve fázi A	[Wb]
$\Psi_{kB}$	spřažený magnetický tok závitů nakrátko ve fázi B	[Wb]
$\Psi_{rA}$	složka spřaženého toku způsobená rotorovými proudy	[Wb]
$\Psi_{sA}$	složka spřaženého toku způsobená statorovými proudy	[Wb]
$\varphi$	relativní vlhkost	[%]
$a_0$	koeficient Fourierovy řady	[-]
$a_n$	koeficient Fourierovy řady	[-]
$b$	šířka drážky	[m]
$b_n$	koeficient Fourierovy řady	[-]
$C$	kapacita	[F]
$\cos\varphi$	účinník	[-]
$\cos\varphi_0$	účinník naprázdno	[-]
$d_k$	průměr valivého elementu	[m]
$d_r$	roztečný průměr	[m]
$e_n$	sudý koeficient rychlé Fourierovy transformace	[-]
$f_1$	frekvence napájení	[Hz]
$f_{dyn}$	frekvence postranních pásem v případě dynamické excentricity	[Hz]
$f_{exc}$	frekvence postranních pásem v případě excentricit hřídele	[Hz]
$F_{im}$	vnitřní elektromagnetická síla	[N]
$f_l$	příspěvek postranních pásem konkrétní poruchy ložiska	[Hz]
$f_{l-el}$	příspěvek postranních pásem poruchy valivého elementu	[Hz]
$f_{l-klec}$	příspěvek postranních pásem v případě poruchy ložiskové klece	[Hz]
$f_{l-vně}$	příspěvek postranních pásem v případě poruchy vnějšího kruhu	[Hz]

$f_{l-vnitř}$	příspěvek postranních pásem v případě poruchy vnitřního kruhu	[Hz]
$f_{lp}$	frekvence postranních pásem v případě poruchy na ložisku	[Hz]
$f_{Nyq}$	Nyquistova frekvence	[Hz]
$f_{rotor}$	frekvence postranních pásem v případě poruchy na rotoru	[Hz]
$f_s$	vzorkovací frekvence	[Hz]
$f_{stat}$	frekvence postranních pásem v případě statické excentricity	[Hz]
$f_{stator}$	frekvence postranních pásem v případě statorových poruch	[Hz]
$f_{synch}$	synchronní frekvence otáčení	[Hz]
$i$	okamžitá hodnota proudu	[A]
$I$	elektrický proud	[A]
$I_0$	proud naprázdno	[A]
$i_A$	okamžitá hodnota proudu ve fázi A	[A]
$I_{abs}$	absolutní hodnota komplexního čísla získaného z FFT	[-]
$i_B$	okamžitá hodnota proudu ve fázi B	[A]
$i_c$	proud kapacitou	[A]
$i_C$	okamžitá hodnota proudu ve fázi C	[A]
$I_n$	jmenovitá hodnota elektrického proudu	[A]
$I_{prim}$	proud primárním vinutím proudového transformátoru	[A]
$I_{ref}$	referenční velikost signálu na první harmonické	[-]
$I_{RMS}$	efektivní hodnota proudu	[A]
$i_s$	okamžitá hodnota proudu jedné statorové fáze obecně	[A]
$I_{sec}$	proud sekundárním vinutím proudového transformátoru	[A]
$I_{vztaž}$	výsledná hodnota vztažená k první harmonické	[-]
$k$	celočíselný koeficient	[-]
$k_a$	koeficient zahrnující asymetrii rotoru	[-]
$k_d$	koeficient drážkování	[-]
$l$	délka vodiče	[m]
$L$	indukčnost	[H]
$n$	pořadí harmonické	[-]
$N$	počet vzorků řady	[-]
$n_n$	jmenovité otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
$nd$	koeficient zohledňující typ excentricity	[-]
$on$	lichý koeficient rychlé Fourierovy transformace	[-]
$p$	počet pól-párů	[-]
$P_1$	jmenovitý příkon stroje	[W]
$p_l$	počet valivých elementů	[-]
$P_n$	jmenovitý činný výkon stroje	[W]
$Q_R$	počet drážek rotoru	[-]
$R$	ohmický odpor	[Ω]

$R_A$	ohmický odpor fáze A	[Ω]
$R_I$	izolační odpor	[Ω]
$R_{I0,5}$	izolační odpor změřený po půl minutě	[Ω]
$R_{I1}$	izolační odpor změřený po jedné minutě	[Ω]
$R_{I10}$	izolační odpor změřený po deseti minutách	[Ω]
$R_{max}$	maximální velikost ohmického odporu	[Ω]
$s$	skluz	[%]
$s_1$	dopočtená hodnota skluzu	[%]
$s_n$	jmenovitý skluz	[%]
$t$	čas, délka signálu	[s]
$T$	perioda	[-]
$T_1$	teplota	[°C]
$U$	elektrické napětí	[V]
$u_A$	okamžitá hodnota napětí fáze A	[V]
$U_{max}$	maximální hodnota napětí detekovaná při rázové zkoušce	[V]
$U_s$	sdružená hodnota napětí	[V]
$X_L$	reaktance	[Ω]

# PŘÍLOHY

## Příloha A – tabulky vypočtených frekvencí pro MCSA

**Tabulka A1. Excentricita – nízké kmitočty**

Excentricita - nízké kmitočty								
n	s <sub>1</sub> =0,202 %		s <sub>1</sub> =0,240 %		s <sub>1</sub> =0,230 %		s <sub>1</sub> =0,206 %	
(-)	f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)	
1	66,633	33,367	66,627	33,373	66,628	33,372	66,632	33,368
2	83,266	16,734	83,253	16,747	83,257	16,743	83,265	16,735
3	99,899	0,101	99,880	0,120	99,885	0,115	99,897	0,103
4	116,532		116,507		116,513		116,529	
5	133,165		133,133		133,142		133,162	
6	149,798		149,760		149,770		149,794	
7	166,431		166,387		166,398		166,426	
8	183,064		183,013		183,027		183,059	
9	199,697		199,640		199,655		199,691	
10	216,330		216,267		216,283		216,323	
11	232,963		232,893		232,912		232,956	
12	249,596		249,520		249,540		249,588	
13	266,229		266,147		266,168		266,220	
14	282,862		282,773		282,797		282,853	
15	299,495		299,400		299,425		299,485	
16	316,128		316,027		316,053		316,117	
17	332,761		332,653		332,682		332,750	
18	349,394		349,280		349,310		349,382	
19	366,027		365,907		365,938		366,014	
20	382,660		382,533		382,567		382,647	
21	399,293		399,160		399,195		399,279	
22	415,926		415,787		415,823		415,911	
23	432,559		432,413		432,452		432,544	
24	449,192		449,040		449,080		449,176	
25	465,825		465,667		465,708		465,808	
26	482,458		482,293		482,337		482,441	
27	499,091		498,920		498,965		499,073	

**Tabulka A2. Excentricita – nízké kmitočty**

Excentricita - nízké kmitočty				
n	$s_1=0,197 \%$		$s_1=0,233 \%$	
(-)	f (Hz)		f (Hz)	
1	66,634	33,366	66,628	33,372
2	83,268	16,732	83,256	16,744
3	99,902	0,099	99,884	0,117
4	116,535		116,511	
5	133,169		133,139	
6	149,803		149,767	
7	166,437		166,395	
8	183,071		183,023	
9	199,705		199,651	
10	216,338		216,278	
11	232,972		232,906	
12	249,606		249,534	
13	266,240		266,162	
14	282,874		282,790	
15	299,508		299,418	
16	316,141		316,045	
17	332,775		332,673	
18	349,409		349,301	
19	366,043		365,929	
20	382,677		382,557	
21	399,311		399,185	
22	415,944		415,812	
23	432,578		432,440	
24	449,212		449,068	
25	465,846		465,696	
26	482,480		482,324	
27	499,114		498,952	

**Tabulka A3. Excentricita – vysoké kmitočty**

Excentricita - vysoké kmitočty								
n	s <sub>1</sub> =0,202 %		s <sub>1</sub> =0,240 %		s <sub>1</sub> =0,230 %		s <sub>1</sub> =0,206 %	
(-)	f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)	
1	1912,90	1812,90	1912,19	1812,19	1912,37	1812,37	1912,82	1812,82
2	1962,90	1762,90	1962,19	1762,19	1962,37	1762,37	1962,82	1762,82
3	2012,90	1712,90	2012,19	1712,19	2012,37	1712,37	2012,82	1712,82
4	2062,90	1662,90	2062,19	1662,19	2062,37	1662,37	2062,82	1662,82
5	2112,90	1612,90	2112,19	1612,19	2112,37	1612,37	2112,82	1612,82
6	2162,90	1562,90	2162,19	1562,19	2162,37	1562,37	2162,82	1562,82
7	2212,90	1512,90	2212,19	1512,19	2212,37	1512,37	2212,82	1512,82
8	2262,90	1462,90	2262,19	1462,19	2262,37	1462,37	2262,82	1462,82
9	2312,90	1412,90	2312,19	1412,19	2312,37	1412,37	2312,82	1412,82
10	2362,90	1362,90	2362,19	1362,19	2362,37	1362,37	2362,82	1362,82
11	2412,90	1312,90	2412,19	1312,19	2412,37	1312,37	2412,82	1312,82
12	2462,90	1262,90	2462,19	1262,19	2462,37	1262,37	2462,82	1262,82
13	2512,90	1212,90	2512,19	1212,19	2512,37	1212,37	2512,82	1212,82
14	2562,90	1162,90	2562,19	1162,19	2562,37	1162,37	2562,82	1162,82
15	2612,90	1112,90	2612,19	1112,19	2612,37	1112,37	2612,82	1112,82
16	2662,90	1062,90	2662,19	1062,19	2662,37	1062,37	2662,82	1062,82
17	2712,90	1012,90	2712,19	1012,19	2712,37	1012,37	2712,82	1012,82
18	2762,90	962,90	2762,19	962,19	2762,37	962,37	2762,82	962,82
19	2812,90	912,90	2812,19	912,19	2812,37	912,37	2812,82	912,82
20	2862,90	862,90	2862,19	862,19	2862,37	862,37	2862,82	862,82
21	2912,90	812,90	2912,19	812,19	2912,37	812,37	2912,82	812,82
22	2962,90	762,90	2962,19	762,19	2962,37	762,37	2962,82	762,82

**Tabulka A4. Excentricita – vysoké kmitočty**

Excentricita - vysoké kmitočty				
n	$s_1=0,197 \%$		$s_1=0,233 \%$	
(-)	f (Hz)		f (Hz)	
1	1912,99	1812,99	1912,32	1812,32
2	1962,99	1762,99	1962,32	1762,32
3	2012,99	1712,99	2012,32	1712,32
4	2062,99	1662,99	2062,32	1662,32
5	2112,99	1612,99	2112,32	1612,32
6	2162,99	1562,99	2162,32	1562,32
7	2212,99	1512,99	2212,32	1512,32
8	2262,99	1462,99	2262,32	1462,32
9	2312,99	1412,99	2312,32	1412,32
10	2362,99	1362,99	2362,32	1362,32
11	2412,99	1312,99	2412,32	1312,32
12	2462,99	1262,99	2462,32	1262,32
13	2512,99	1212,99	2512,32	1212,32
14	2562,99	1162,99	2562,32	1162,32
15	2612,99	1112,99	2612,32	1112,32
16	2662,99	1062,99	2662,32	1062,32
17	2712,99	1012,99	2712,32	1012,32
18	2762,99	962,99	2762,32	962,32
19	2812,99	912,99	2812,32	912,32
20	2862,99	862,99	2862,32	862,32
21	2912,99	812,99	2912,32	812,32
22	2962,99	762,99	2962,32	762,32



**Tabulka A5. Rotorové tyče**

Rotorové tyče								
n	$s_1=0,202\%$		$s_1=0,240\%$		$s_1=0,230\%$		$s_1=0,206\%$	
(-)	f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)		f (Hz)	
1	50,202	49,798	50,240	49,760	50,212	49,768	50,206	49,794
2	50,404	49,596	50,480	49,520	50,434	49,546	50,412	49,588
3	50,606	49,394	50,720	49,280	50,657	49,323	50,618	49,382
4	50,808	49,192	50,960	49,040	50,879	49,101	50,824	49,176
5	51,010	48,990	51,200	48,800	51,101	48,879	51,030	48,970
6	51,212	48,788	51,440	48,560	51,323	48,657	51,236	48,764
7	51,414	48,586	51,680	48,320	51,546	48,434	51,442	48,558
8	51,616	48,384	51,920	48,080	51,768	48,212	51,648	48,352
9	51,818	48,182	52,160	47,840	51,990	47,990	51,854	48,146
10	52,020	47,980	52,400	47,600	52,212	47,768	52,060	47,940
11	52,222	47,778	52,640	47,360	52,434	47,546	52,266	47,734
12	52,424	47,576	52,880	47,120	52,657	47,323	52,472	47,528
13	52,626	47,374	53,120	46,880	52,879	47,101	52,678	47,322
14	52,828	47,172	53,360	46,640	53,101	46,879	52,884	47,116
15	53,030	46,970	53,600	46,400	53,323	46,657	53,090	46,910
16	53,232	46,768	53,840	46,160	53,546	46,434	53,296	46,704

**Tabulka A6. Rotorové tyče**

Rotorové tyče				
n	$s_1=0,197\%$		$s_1=0,233\%$	
(-)	f (Hz)		f (Hz)	
1	50,197	49,803	50,233	49,767
2	50,394	49,606	50,466	49,534
3	50,591	49,409	50,699	49,301
4	50,788	49,212	50,932	49,068
5	50,985	49,015	51,165	48,835
6	51,182	48,818	51,398	48,602
7	51,379	48,621	51,631	48,369
8	51,576	48,424	51,864	48,136
9	51,773	48,227	52,097	47,903
10	51,970	48,030	52,330	47,670
11	52,167	47,833	52,563	47,437
12	52,364	47,636	52,796	47,204
13	52,561	47,439	53,029	46,971
14	52,758	47,242	53,262	46,738
15	52,955	47,045	53,495	46,505
16	53,152	46,848	53,728	46,272

## Příloha B – script v Matlabu

```
% Načtení a výpočet základních hodnot
load m1.txt;
i=m1(:,2);
ia=i*1000;
fs=50000;
T=1/fs;
L=length(ia);
t=(0:L-1)*T;
nfft=2^nextpow2(L);
w=hann(L);
io=ia.*w;
I=fft(io,nfft)/L;
Ia=abs(I);
f=fs/2*linspace(0,1,nfft/2+1);

% Vztažení hodnot vůči 1. harmonické
Iref=max(Ia);
Inorm=20*log10(Ia/Iref);

% Hodnoty pro vynesení spektrogramu
okno=50000;
prekryti=40000;
nft=50000;

% Vynesení spektrogramu 0-500 Hz
figure;
spectrogram(ia,okno,prekryti,nft,fs);
colormap hsv;
set(gca, 'XLim',[0,500]);
view([90 -90]);
xlabel('f (Hz)','FontSize',9);
ylabel('t (s)','FontSize',9);

% Nahrání kritických hodnot frekvencí
load r0238.txt
x=r0238(:,1);
load en0238.txt;
x2=en0238(:,1);
load ev0238.txt;
x3=ev0238(:,1);

% Výběr a úprava 2^23 vzorků
i=m1(1:2^23,2);
ia=i*1000;
L=length(ia);
t=(0:L-1)*T;
nfft=2^nextpow2(L);
w=hann(L);
io=ia.*w;
I=fft(io,nfft)/L;
Ia=abs(I);
f=fs/2*linspace(0,1,nfft/2+1);
Iref=max(Ia);
Inorm=20*log10(Ia/Iref);
```

```

% Frekvenční spektrum - rotorové tyče
figure;
plot(f, (Inorm(1:nfft/2+1)), 'Color', [0 0.447 0.741]);
set(gca, 'YLim', [-100,0]);
set(gca, 'XLim', [47,53]);
xlabel('f (Hz)');
ylabel('Magnituda (dB)');
y=[-48 -52];
line([x x],y, 'Color', [0 0 0], 'LineWidth', 0.35, 'LineStyle', '-');
set(gca, 'fontsize', 8);

% Výběr a úprava 2^19 vzorků podle spectrogramu
i=m1(4000001:4000000+2^19,2);
ia=i*1000;
L=length(ia);
t=(0:L-1)*T;
nfft=2^nextpow2(L);
w=hann(L);
io=ia.*w;
I=fft(io,nfft)/L;
Ia=abs(I);
f=fs/2*linspace(0,1,nfft/2+1);
Iref=max(Ia);
Inorm=20*log10(Ia/Iref);

% Frekvenční spektrum - excentricita nízké kmitočty
figure;
plot(f, (Inorm(1:nfft/2+1)), 'Color', [0 0.447 0.741]);
set(gca, 'YLim', [-140,0]);
set(gca, 'XLim', [0,500]);
xlabel('f (Hz)', 'FontSize', 9);
ylabel('Magnituda (dB)', 'FontSize', 9);
y1=[-70 -75];
line([x2 x2],y1, 'Color', [0 0 0], 'LineWidth', 0.35, 'LineStyle', '-');
set(gca, 'fontsize', 8);

% Frekvenční spektrum - excentricita vysoké kmitočty
figure;
plot(f, (Inorm(1:nfft/2+1)), 'Color', [0 0.447 0.741]);
set(gca, 'YLim', [-150,0]);
set(gca, 'XLim', [750,1100]);
xlabel('f (Hz)', 'FontSize', 9);
ylabel('Magnituda (dB)', 'FontSize', 9);
y2=[-80 -85];
line([x3 x3],y2, 'Color', [0 0 0], 'LineWidth', 0.35, 'LineStyle', '-');
set(gca, 'fontsize', 8);

% Frekvenční spektrum - excentricita vysoké kmitočty
figure;
plot(f, (Inorm(1:nfft/2+1)), 'Color', [0 0.447 0.741]);
set(gca, 'YLim', [-150,0]);
set(gca, 'XLim', [1100,1450]);
xlabel('f (Hz)', 'FontSize', 9);
ylabel('Magnituda (dB)', 'FontSize', 9);
line([x3 x3],y2, 'Color', [0 0 0], 'LineWidth', 0.35, 'LineStyle', '-');
set(gca, 'fontsize', 8);

```

## Příloha C – fotografie



Obrázek C1. Měřicí ústředna MMU-K na platformě MOSAD®5